

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta stavební

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Brno, 2018

Rastislav Vozák



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV CHEMIE

INSTITUTE OF CHEMISTRY

VLIV KAMENIVA NA REOLOGII VÁPENNÝCH MALT

EFFECT OF AGGREGATE TYPE ON LIME MORTAR RHEOLOGY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Rastislav Vozák

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Mgr. MARTIN VYŠVAŘIL, Ph.D.

BRNO 2018



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	B3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Bakalářský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3607R020 Stavebně materiálové inženýrství
Pracoviště	Ústav chemie

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student	Rastislav Vozák
Název	Vliv kameniva na reologii vápenných malt
Vedoucí práce	Mgr. Martin Vyšvařil, Ph.D.
Datum zadání	30. 11. 2017
Datum odevzdání	25. 5. 2018

V Brně dne 30. 11. 2017

doc. Ing. Jitka Malá, Ph.D.
Vedoucí ústavu

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA
Děkan Fakulty stavební VUT

PODKLADY A LITERATURA

- Westerholm, M., Lagerblad, B., Silfwerbrand, J., Forssberg, E. Influence of fine aggregate characteristics on the rheological properties of mortars. *Cement & Concrete Composites*, 2008, Vol. 30, 274–282.
- Bounedjema, Y., Ezziane, K., Hallal, A. Variation of mechanical and rheological properties of mortar by replacement of natural sand with crushed sand. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2017, Vol. 31(2), 182–201.
- Kabagire, K.D., Diederich, P., Yahia, A., Chekired, M. Experimental assessment of the effect of particle characteristics on rheological properties of model mortar, *Construction and Building Materials*, 2017, Vol. 151, 615–624.
- Ellis, S., Lawrence, M., Walker, P. A Critical Review of the Effect of Calcitic Aggregate on Air Lime Mortar, *Chemistry and Materials Research*, 2013, Vol. 5, 97–101.
- Holubová, R. *Základy reologie a reometrie kapalin*. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 2014. ISBN 978-80-244-4178-8.
- Žižlavský, T. *Vliv použitého kameniva na vlastnosti vápenných malt*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2017, diplomová práce.

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

S pomocí uvedené literatury proveďte literární rešerši v oblasti vápenných malt s přihlédnutím k ovlivnění vlastností malt volbou druhu použitého kameniva (křemen, vápenc, čedič). Uveďte využití jednotlivých druhů kameniv v praxi a poukažte na výhody/nevýhody použití konkrétního druhu kameniva ve vápenných maltách. Zaměřte se též na ovlivnění reologických vlastností malt různým typem kameniva. Uveďte základní reologické parametry popisující chování stavebních poživ v čerstvém stavu a metody jejich stanovení. Pro vypracování teoretické části bakalářské práce použijte zadanou literaturu a doplňte ji o vlastní literární rešerši k tématu.

V experimentální části porovnejte vliv křemenného, vápencového a čedičového kameniva o různé granulometrii na reologické vlastnosti vápenných malt při stejném vodním součiniteli. Ke stanovení reologických parametrů použijte rotační a oscilační testy. Výsledky zpracujte do přehledných tabulek a grafů, proveďte diskuzi a zhodnocení dosažených výsledků. Bakalářskou práci zpracujte v rozsahu 40 až 50 stran.

STRUKTURA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).
2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).

ABSTRAKT

Predmetom tejto bakalárskej práce je skúmanie vplyvu kameniva na reologické vlastnosti vápenných mált. V teoretickej časti sa táto práca zaoberá popisom typov kvapalín a základných reologických veličín. Následne sú popísané niektoré z reologických modelov správania sa nenewtonských kvapalín. Ďalej v teoretickej časti je popísané meranie toku, používané zariadenia vrátane opisu oscilačného merania a jednotlivých režimov. K popisu reológie vápenných mált bola použitá dostupná vedecká literatúra a zahŕňa vplyv prídavku rôznych druhov prísad na reologické správanie. Tiež je charakterizovaný vplyv kameniva na vlastnosti vápenných mált.

Experimentálna časť sa zaoberá vplyvom troch rôznych druhov kameniva na reologické vlastnosti čerstvých vápenných mált. Bolo stanovené chemické zloženie kamenív a ich čiary zrnitosti. Nasledovali tokové merania, ktoré boli vyhodnotené do tokových kriviek. Stanovovala sa medza toku, koeficient konzistencie a tokový index. Pri oscilačnom meraní sa meral komplexný, elastický a viskózný modul a strato-vý faktor.

KLÍČOVÁ SLOVA

Reológia, vápenná malta, kamenivo, čadič, vápenec, kremenný piesok, oscilačné meranie, tokové krivky, medza toku, komplexný modul, LVR, elastický modul, viskózný modul, bod toku

ABSTRACT

The subject of this bachelor thesis is examining the effect of aggregate type on lime mortar rheology. In the theoretical part, the thesis describes types of liquids and basic rheological quantities. Afterwards there are described some of the rheological behaviour models of non-Newtonian fluids. Furthermore, the theoretical part characterizes measurement of the flow, devices used for the measurement including the oscillatory measurement and its individual modes. Scientific literature was used to describe the rheology of the lime mortars and it covers the effect of different additives on the rheological behaviour. There is also characterized the effect of aggregate on the properties of lime mortars.

The experimental part talks about the effect of three various kinds of aggregate on rheological properties of the fresh lime mortar. The chemical composition of aggregates and their granulometry was determined. Subsequently, flow measurements were carried out and evaluated into flow curves. The yield stress, coefficient of consistency and flow index were assayed. In the oscillatory measurement there were measured complex, elastic and viscous modulus and loss factor.

KEYWORDS

Rheology, lime mortar, aggregate, basalt, limestone, silica sand, oscillatory measurement, flow curves, yield stress, complex modulus, LVR, elastic modulus, viscous modulus, flow point

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VŠKP

Rastislav Vozák *Vliv kameniva na reologii vápenných malt*. Brno, 2018 57 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav chemie. Vedoucí práce Mgr. Martin Vyšvařil, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 4. 1. 2018

Rastislav Vozák

autor práce

PODĚKOVÁNÍ

Veľmi rád by som sa poďakoval pánovi Mgr. Martinovi Vyšvařilovi, Ph.D. za cenné odborné rady a pripomienky, ktoré mi pomohli vypracovať bakalársku prácu a za čas, ktorý mi venoval na konzultáciách práce.

OBSAH

ÚVOD.....	- 10 -
1. REOLÓGIU.....	- 11 -
1.1. NEWTONSKÉ KVAPALINY	- 11 -
1.2. NENEWTONSKÉ KVAPALINY	- 12 -
1.3. ZÁKLADNÉ REOLOGICKÉ VELIČINY	- 12 -
1.4. REOLOGICKÉ MODELY SPRÁVANIA SA NENEWTONSKÝCH KVAPALÍN	- 15 -
1.4.1. Pseudoplastické správanie sa kvapalín	- 15 -
1.4.2. Dilatantné správanie kvapalín.....	- 15 -
1.4.3. Binghamské správanie kvapalín	- 16 -
1.4.4. Tixotropné správanie kvapalín	- 16 -
1.4.5. Reopektické správanie kvapalín	- 17 -
1.5. REOLOGICKÉ MODELY.....	- 17 -
1.5.1. Herschel-Bulkley model	- 18 -
1.5.2. Ostwald model.....	- 18 -
1.5.3. Bingham model	- 18 -
1.6. MERANIE TOKU	- 19 -
1.7. TYPY REOMETROV/VISKOZIMETROV	- 19 -
1.8. ROTAČNÉ REOMETRE	- 20 -
1.8.1. Systém valec – valec.....	- 20 -
1.8.2. Systém kužeľ – doska	- 21 -
1.8.3. Systém doska – doska.....	- 21 -
1.9. OSCILAČNÉ MERANIA.....	- 22 -
1.9.1. Oscilačné meranie – režim frekvencie.....	- 23 -
1.9.2. Oscilačné meranie – režim amplitúdy	- 23 -
1.9.3. Oscilačné meranie – režim teploty.....	- 24 -
1.9.4. Oscilačné meranie – režim času	- 24 -
2. REOLÓGIA VÁPENNÝCH MÁLT.....	- 25 -
2.1. VPLYV KAMENIVA NA REOLÓGIU CEMENTOVÝCH MÁLT	- 26 -
2.2. VPLYV VODORETENČNÝCH PRÍSAD NA REOLÓGIU ČERSTVÝCH VÁPENNÝCH MÁLT	- 27 -
2.2.1. Étery celulózy	- 27 -
2.2.2. Étery chitosanu	- 28 -
2.2.3. Étery guaranovej gumy.....	- 28 -
2.3. VPLYV PLASTIFIKÁTORA NA REOLÓGIU VÁPENNÝCH MÁLT	- 28 -
2.4. VPLYV PREVZDUŠŇOVACEJ PRÍSADY NA REOLÓGIU VÁPENNÝCH MÁLT	- 29 -
3. VPLYV KAMENIVA NA VLASTNOSTI VÁPENNÝCH MÁLT	- 30 -

4. EXPERIMENTÁLNA ČASŤ	- 33 -
4.1. POUŽITÉ SUROVINY	- 33 -
4.1.1. Vápenný hydrát	- 33 -
4.1.2. Drvený vápenec	- 33 -
4.1.3. Drvený čadič.....	- 33 -
4.1.4. Kremenný piesok.....	- 34 -
4.2. POUŽITÉ SKÚŠOBNÉ ZARIADENIA	- 36 -
4.2.1. Rotačný reometer.....	- 36 -
4.3. PRÍPRAVA VZORIEK	- 36 -
4.4. POUŽITÉ SKÚŠOBNÉ METÓDY	- 37 -
4.4.1. Stanovenie tokových vlastností	- 37 -
4.4.2. Stanovenie viskoelastických vlastností.....	- 38 -
4.4.2.1. Oscilačné meranie – režim amplitúdy	- 38 -
4.4.2.2. Oscilačné meranie – režim frekvencie	- 38 -
4.5. VÝSLEDKY A DISKUSIA	- 38 -
4.5.1. Tokové vlastnosti.....	- 38 -
4.5.2. Oscilačné meranie – režim amplitúdy	- 43 -
4.5.3. Oscilačné meranie – režim frekvencie.....	- 46 -
5. ZÁVER.....	- 48 -
6. ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY.....	- 50 -
7. ZOZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKOV.....	53
8. ZOZNAM POUŽITÝCH TABULIEK.....	55
9. ZOZNAM POUŽITÝCH SKRATIEK A SYMBOLOV.....	56

Úvod

Reológia je vedný odbor, ktorý sa zaoberá deformáciou a tokom látok. Tento vedný odbor našiel využitie nielen v stavebníctve, ale aj v medicíne, potravinárstve či farmácii. V stavebníctve je tento odbor veľmi dôležitý, pretože znalosť reologických vlastností ovplyvňuje finálne vlastnosti stavebných materiálov ako je pevnosť, tvrdosť, mrazuvzdornosť atď. Na reologické vlastnosti materiálov v čerstvom stave má predovšetkým vplyv množstvo vody, doba a spôsob miešania, množstvo a typ použitej prísady, či obsah jemných častíc a typ plniva alebo spojiva. Tieto faktory majú vplyv na energetickú náročnosť pri miešaní, alebo pri ich aplikácii.

Táto bakalárska práca sa zaoberá vplyvom kameniva na reologické vlastnosti čerstvých vápenných mált. Kamenivo v maltách plní funkciu plniva a kamenivo podľa spôsobu získavania môže byť buď ťažené alebo drvené. To má vplyv na reologické vlastnosti malty kvôli tvaru zrna a mernému povrchu. Ďalej poznáme veľa druhov kameniva a každé kamenivo má špecifické vlastnosti ako nasiakavosť, pórovitosť, pevnosť atď., čo má tiež vplyv na reologické vlastnosti. V neposlednom rade, aj množstvo jemných častíc a zastúpenie jednotlivých frakcií vo vápennej malte má vplyv na výsledné reologické vlastnosti.

Cieľom tejto bakalárskej práce bolo vytvoriť literárnu rešerš z oblasti vápenných mált s prihliadnutím na vplyv kameniva na reológiu vápenných mált. Boli popísané základné reologické veličiny, reologické modely, typy meraní a vplyv prísad na reologické vlastnosti vápenných mált a vplyv kameniva na vlastnosti vápenných mált.

V experimentálnej časti bolo úlohou porovnať reologické vlastnosti vápenných mált s rôznym typom kameniva pri zachovaní rovnakého dávkovania vody a spojiva. Tieto malty boli následne porovnávané pomocou tokových a oscilačných meraní, ktoré boli vyhodnotené do tabuliek a grafov.

1. Reológia

Reológia je vedný odbor, ktorý sa zaoberá deformáciou a tokom. Táto definícia bola schválená v roku 1929. Má korene v gréčtine, kde preklad slova rheos znamená rieka, tok alebo prúdenie. V doslovnom preklade reológia znamená veda o toku. Táto vedná disciplína teda skúma vzťahy medzi rôznymi deformáciami hmoty a skúma dôsledky a prejavy deformácií na skúmaných vzorkách. Reológia sa v konečnom dôsledku nezaoberá tokovým správaním iba kvapalín, ale aj tuhých látok, pretože aj tie sú schopné za určitých podmienok tečieť. Poznanie reologického správania tekutých materiálov je dôležité pre rôzne technologické procesy. Znalosť reologických veličín je potrebná na definovanie surovín a produktov, na riešenie technických úloh a inžinierskych výpočtov, na vylepšovanie a kontrolu výrobných a dopravných zariadení. Jedným z hlavných cieľov reológie je empiricky stanoviť vzťah medzi deformáciami a napätiami na základe meraní a tie následne formulovať do matematických vzťahov. Podľa správania sa kvapaliny rozdeľujú na:

1. newtonské,
2. nenewtonské.

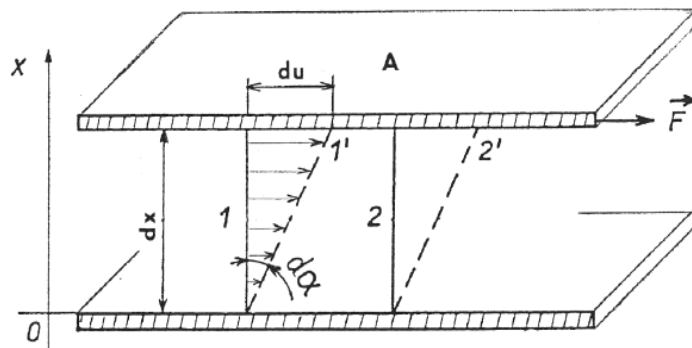
1.1. Newtonské kvapaliny

Newtonské kvapaliny boli pomenované po fyzikovi Issacovi Newtonovi (1642 – 1726), ktorý popísal tok kvapalín jednoduchým lineárnym vzťahom medzi šmykovým napätím a rýchlosťou šmykovej deformácie (rovnica 1).

$$\tau = \eta \cdot \dot{\gamma} = \eta \cdot \frac{du}{dx} \quad (1)$$

τ	šmykové napätie [Pa]
η	dynamická viskozita [Pa·s]
$\dot{\gamma}$	gradient rýchlosti deformácie [s ⁻¹]

Táto rovnica charakterizuje tvarové zmeny v tečúcej kvapaline resp. vzájomnú rýchlosť pohybu šmykových rovín du , ktoré sú od seba vzdialené o dx ako môžeme vidieť na obrázku 1.



Obr. 1 Zobrazenie rýchlostného toku v kvapaline medzi nepohyblivou a pohyblivou doskou [2]

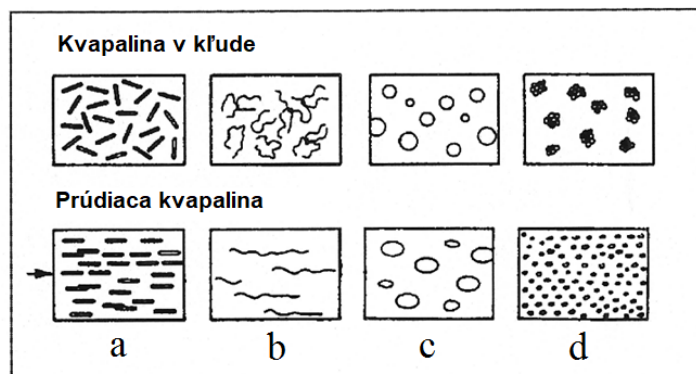
Tento vzťah je známy ako Newtonov zákon viskozity. Newtonské kvapaliny sú napríklad voda, organické rozpúšťadlá alebo napríklad aj med. Dynamická viskozita týchto kvapalín je závislá len na teplote a tlaku. Newtonské kvapaliny majú lineárny nárast šmykového napätia voči gradientu rýchlosti deformácie. Sklon krivky je daný viskozitou [2, 5].

1.2. Nenewtonské kvapaliny

Kvapaliny, ktoré sú reologicky zložitejšie ako newtonské kvapaliny, nazývame nenewtonské kvapaliny. V skutočnosti je väčšina kvapalín nenewtonskej povahy. Ich viskozita je závislá od gradientu rýchlosti deformácie alebo od vývoja deformácie. Na rozdiel od newtonských kvapalín, vykazujú nelineárny priebeh medzi šmykovým napätím a gradientom rýchlosti deformácie. Ich medza toku a viskozita je závislá na čase a vývoji deformácie. Tieto kvapaliny nie sú podriadené klasickému Newtonovmu zákonu. Sú to napríklad roztoky a taveniny polymérov, suspenzie, rôzne pasty, malty a väčšina stavebných materiálov. Pre tieto kvapaliny platí obdobná Newtonova rovnica (rovnica 2).

$$\tau = \eta \cdot \dot{\gamma} \quad (2)$$

Veličina η je zdánlivá viskozita, ktorá nie je konštantou, ale závisí na rýchlosti deformácie a dotyčnicovom napätí. Pre lepšiu predstavu je správanie kvapalín pod vplyvom toku znázornené na obrázku 2 [2, 5].



Obr. 2 Zobrazenie častíc v nenewtonskej kvapaline pod vplyvom toku: a) orientácia, b) napriamenie, c) deformácia, d) rozomletie [2]

1.3. Základné reologické veličiny

Pomocou týchto veličín a grafov sa bližšie definuje reologické správanie kvapalín.

Dynamická viskozita

Nastáva pri pohybe dvoch rovnobežných dosiek, ktoré sa pohybujú rovnomerným priamočiarym pohybom proti sebe. Dynamická viskozita je závislá na teplote. So zvyšujúcou sa teplotou plynov jej hodnota stúpa a pri kvapalinách naopak klesá. Táto viskozita je definovaná

Newtonovou rovnicou (rovnica 1). Prevrátená hodnota dynamickej viskozity je fluidita, čo znamená tekutosť [1, 6].

Tab. 1 Porovnanie viskozity vody a glycerínu v závislosti na teplote [2]

T [°C]	η [mPa·s]	η [mPa·s]
	voda	glycerín
0	1,792	12100
20	1,002	1480
40	0,653	238
60	0,466	81

Kinematická viskozita

Je podiel dynamickej viskozity a hustoty vzorky. Kinematickú viskozitu je vhodné používať pri dejoch, v ktorých hrá rolu okrem dynamickej viskozity aj hustota. Je daná rovnicou číslo 3. Staršou jednotkou kinematickej viskozity je stok [St = cm²·s⁻¹], pričom platí, že 1 St má hodnotu 10⁻⁴ m²·s⁻¹ [1].

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad (3)$$

ν kinematická viskozita [mm²·s⁻¹]

η dynamická viskozita [Pa·s]

ρ hustota [kg·m⁻³]

Zdanlivá viskozita

Zdanlivá viskozita sa vyskytuje len pri kvapalinách neneutonských. Nie je ich látkovým parametrom, ale premennou veličinou. Jej hodnota sa mení podľa okamžitého použitého napätia a neslúži na fyzikálne hodnotenie konzistencie neneutonských kvapalín. Platí teda, že zdanlivá viskozita je pomer okamžitej hodnoty šmykového napätia a šmykovej rýchlosti [3, 7].

Plastická viskozita n_p

Platí pre binghamské látky, ktoré budú preberané v nasledujúcich kapitolách. Jej hodnota je konštantná, ale platí len pre tekutiny, ktorých šmykové napätie je až za medzou toku. Jej jednotkou je Pa·s [8].

Koeficient konzistencie K

Je parameter, ktorý definuje reologické vlastnosti tekutín s mocninovým reologickým modelom. Jej hodnota nie je konštantná, ale je závislá od rýchlosti deformácie kvapaliny. Jej jednotkou je Pa·s [8].

Šmykové napätie

Šmykové napätie je definované ako sila F , ktorá tangenciálne pôsobí na plochu A . Tá je na rozhraní medzi hornou a dolnou vrstvou kvapaliny. Rýchlosť toku, ktorá odpovedá danej

sile je ovplyvnená vnútornou odolnosťou kvapaliny resp. jej viskozitou. Jej jednotkou je Pa a vypočíta sa podľa rovnice 4 [2].

$$\tau = \frac{F}{A} \quad (4)$$

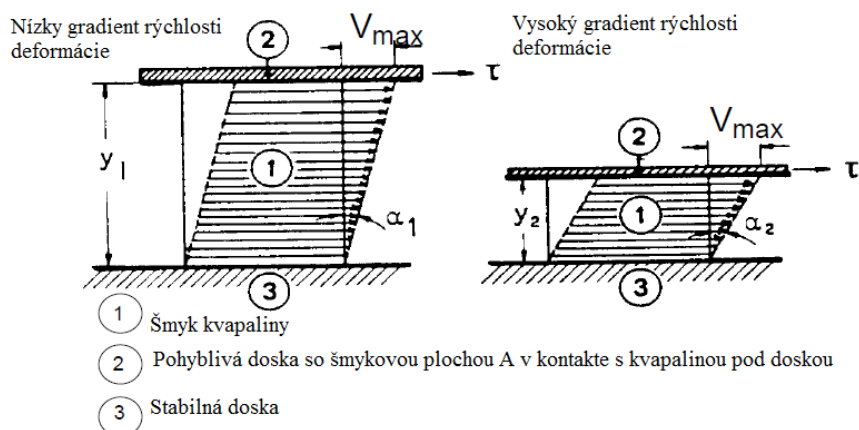
τ šmykové napätie [Pa]
 F sila [N]
 A plocha [m²]

Gradient rýchlosti deformácie

Šmykové napätie spôsobuje tok kvapaliny, ktorý je možné popísať špeciálnym modelom. Rýchlosť toku V_{max} sa nachádza na hornej hranici medzi dvoma rovnobežnými doskami. Pozdĺž prierezu y rýchlosť klesá až do hodnoty $V_{min} = 0$ pri kontakte so stacionárnou doskou. Kvapalina tečie laminárnym tokom, teda pohybom nekonečne tenkých vrstiev kvapaliny. Tieto vrstvy sú vzájomne rovnobežné a jedna sa posúva v závislosti na ďalšie vrstvy. To pripomína karty v balíku kariet, ako je zobrazené na obrázku 3. Gradient rýchlosti deformácie je potom daný rozdielom rýchlosti dvoch dosiek du a rozdielom ich vzdialenosti dx . Je daný rovnicou 5 [2, 9].

$$\dot{\gamma} = \frac{du}{dx} \quad (5)$$

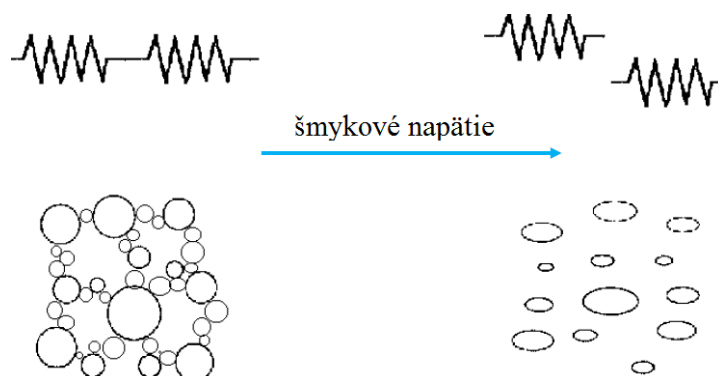
du rozdiel rýchlostí dvoch vzájomne rovnobežných dosiek
 dx rozdiel posunov dvoch vzájomne rovnobežných dosiek



Obr. 3 Tok medzi dvoma rovnobežnými doskami [9]

Medza toku

Pri niektorých newtonských kvapalinách, ktoré sa správajú plasticky alebo binghamsky je na uvedenie do toku potrebné dosiahnutie určitej hodnoty šmykového napätia. Táto hodnota sa nazýva medza toku a vtedy prechádza kvapalina z elastického do tokového správania, tak ako je zobrazené na obrázku 4. Medza toku sa označuje τ_0 a je vyjadrená v Pa [3].



Obr. 4 Prechod kvapaliny z elastického do tokového správania po dosiahnutí medze toku [3]

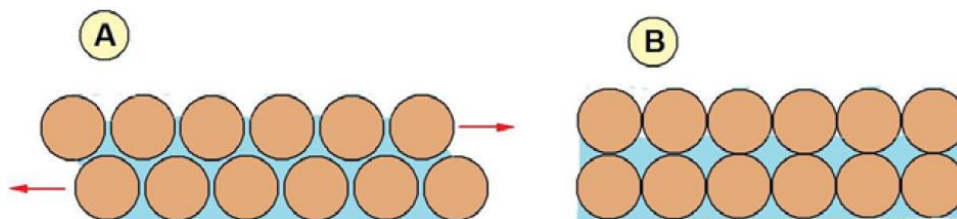
1.4. Reologické modely správania sa nenewtonských kvapalín

1.4.1. Pseudoplastické správanie sa kvapalín

Je charakteristické tým, že so zväčšujúcim sa šmykovým napätím klesá zdanlivá viskozita kvapalín. Preto ich nazývame aj riedené kvapaliny. Medzi pseudoplastické tekutiny sa môžu zaradiť napríklad kaly, pasty, taveniny, celulóзовé deriváty, kaučuky, latexy, farby atď. Ak sa zvyšuje rýchlostný gradient pseudoplastických tekutín, môže sa pozorovať narovnanie nesúmerných častíc alebo molekúl. Tieto častice sa v pokoji náhodne premiešavajú, ale ak sa uvedú do pohybu, začnú sa narovnávať v smere osy do smeru pohybu. Pseudoplastické kvapaliny tečú už pri nízkom napätí, čo je z technického hľadiska priaznivá vlastnosť, pretože znižujú energetickú náročnosť pri výrobných procesoch miešania a pri prúdení kvapaliny napr. potrubím [7].

1.4.2. Dilatantné správanie kvapalín

Na rozdiel od pseudoplastických tekutín sú dilatantné kvapaliny charakteristické tým, že so zvýšením dotyčnicového napätia sa pozoruje zvýšenie zdanlivej viskozity (hustnúce tekutiny). Tekutiny, pri ktorých sa vyskytuje dilatantné chovanie sú napríklad tlačiarenské farby, rozpúšťadlá farieb, arabská guma, med a iné. Tieto kvapaliny pri malých napätiach pripomínajú kvapaliny newtonské a zdanlivá viskozita je konštantná. Pri väčších napätiach nastáva náhly nárast zdanlivej viskozity. Tento jav je v technologických procesoch nepriaznivý. Raynolds vysvetľuje dilatanciu nasledovne: Ak je suspenzia v pokoji, tak kvapalina, ktorá sa nachádza medzi časticami je dostatočujúca na vyplnenie priestorov medzi zrnami. Avšak, ak sa tekutina začne pohybovať s malým rýchlostným gradientom, kvapalina začne pôsobiť ako mazivo medzi časticami a napätia sú malé. Pri zvýšení rýchlostného gradientu sa častice začnú vrstviť, suspenzia sa roztiahne (dilatuje) a zvyšuje sa medzerovitosť, ako je zobrazené na obrázku 5. Vtedy sa premiestni tekutina do vertikálnej časti medzi zrnami a v horizontálnej časti vznikne nedostatok maziva, zvýši sa trenie, a tým pádom sa zvýši aj tangenciálne napätie. V praxi je výskyt dilatantného chovania tekutín veľmi malý [7].



Obr. 5 Usporiadanie guľových častíc v suspenziách pri dilatantnom chovaní tekutín (stav A - kvapalina v pokoji, stav B – zvyšujúci sa rýchlostný gradient, suspenzia dilatuje a je nedostatok maziva medzi zrnami, čím sa zvyšuje trenie) [7]

1.4.3. Binghamské správanie kvapalín

Tento typ tekutín má v pokoji trojrozmernú štruktúru, ktorá má takú tuhosť, že dokáže vzdorovať napätiu, ktoré je menšie ako jeho medza deformácie alebo tiež dynamická medza toku. Ak je dosiahnutá táto hodnota, tak sa štruktúra rozpadne a tekutina začne tiecť, čiže sa začne chovať ako newtonská kvapalina. Po znížení napätia sa v látke opäť obnoví štruktúra. Tieto známky správania sú typické hlavne pre koncentrované kašovité a zrnité suspenzie ako aj priemyselné, odpadné, vrtné a stokové kaly, blato, riedke kaše, pasty, plastické gély, olejové farby a pod. [7].

Tab. 2 Vlastnosti, charakteristika a príklady niektorých typov tekutín [8]

Typ tekutiny	Vlastnosti	Charakteristika	Príklady
PLASTICKÉ TUHÉ LÁTKY	Dokonale plastické	Trvalé deformácie bez vnútorných zvyškových napätí.	kovy typu zlato, meď, hliník
	Binghamské	Lineárna závislosť medzi šmykovými napätiami a rýchlosťou deformácie za hranicou šmykovej medze toku.	blato, niektoré kolo- idné roztoky, pasty
	Pseudoplastické s medzou toku	Pseudoplastické za hranicou šmykovej medze toku.	
	Dilatantné s medzou toku	Dilatantné za hranicou šmykovej medze toku.	
MOCNINOVÉ TEKUTINY	Pseudoplastické	Zdanlivá viskozita klesá so zvyšujúcou sa rýchlosťou deformácie.	koloidy, íly, mlieko, želatína, krv atď.
	Dilatantné	Zdanlivá viskozita narastá so zvyšujúcou sa rýchlosťou deformácie.	koncentrované roztoky cukru vo vode, roztoky škrobu

Poznáme aj kvapaliny, ktorých viskozita je závislá na dobe resp. čase pôsobenia napätia. Tieto kvapaliny rozdeľujeme podľa správania na tixotropné a reopektické kvapaliny.

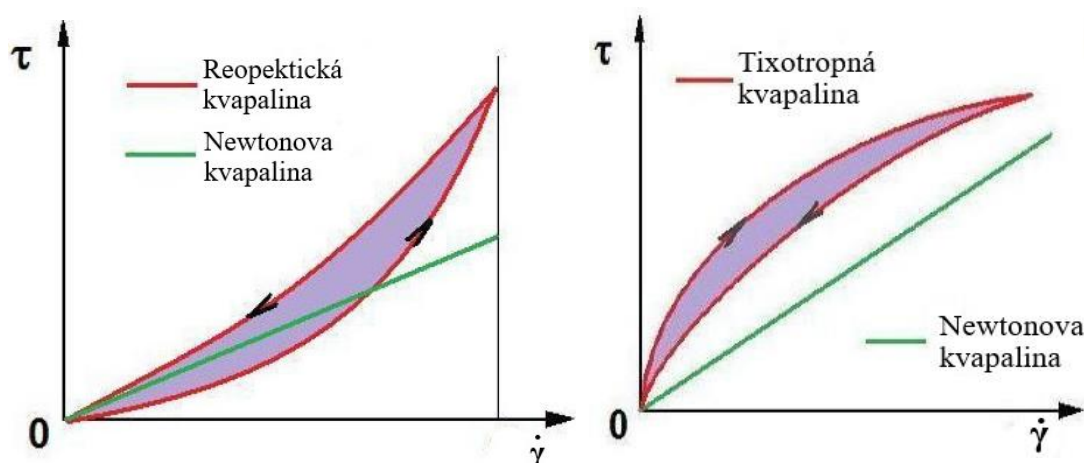
1.4.4. Tixotropné správanie kvapalín

Pri týchto kvapalinách klesá zdanlivá viskozita s predlžujúcou sa dobou pôsobenia napätia, to znamená, že v čase rednú. Ak je kvapalina po miešaní v pokoji, tak sa obnovuje pôvodná štruktúra a viskozita sa blíži pôvodnej hodnote. Závislosť šmykového napätia na gradiente šmykovej rýchlosti, je zobrazená na obrázku 6. Tixotropné správanie vykazujú látky, ktoré sú

plastické a pseudoplastické. Pri technologických postupoch využívame toto správanie napr. pre stanovenie spúšťacieho príkonu miešadiel [1, 2, 7, 29].

1.4.5. Reopektické správanie kvapalín

Toto správanie je veľmi zriedkavé a je definované tým, že zdanlivá viskozita kvapalín počas šmykového namáhania rastie, teda hustnú v čase. Po zanechaní kvapaliny v pokoji sa taktiež obnovuje štruktúra, ale iba ak sa počas deformácie nepoškodili molekuly. Tento typ správania sa vyskytuje pri kvapalinách dilatantných. Toková krivka reopektických kvapalín je zobrazená na obrázku 6. Toto správanie je typické napr. pre suspenzie bentonitu [1, 7, 29].



Obr. 6 Toková krivka reopektickej (vľavo) a tixotropnej kvapaliny (vpravo) [7]

1.5. Reologické modely

Sú to modely, ktoré sa môžu tiež považovať za rovnice. Tieto matematické modely popisujú reologické dáta ako napríklad závislosť šmykového napätia na šmykovej rýchlosti. Získané údaje sú následne vyhodnotené v tokovej krivke. Reologické modely sa zaraďujú do nasledujúcich kategórií a to:

- Empirické,
- Teoretické,
- Štrukturálne.

Empirické modely sú odvodzované z meraní. Teoretické modely sú odvodené zo základných pojmov a poskytujú cenné usmernenia na pochopenie danej úlohy. Štrukturálny model je odvodený z úvah o štruktúre. Môže byť použitý spolu s experimentálnymi výsledkami pre lepšie pochopenie reologického správania. Niekoľko reologických modelov sa aplikuje na reogramy a využívajú sa na získanie informácií o reologickom správaní kvapalín. Pre nenenewtonské kvapaliny sa väčšinou používajú tri matematické modely a to:

- Hershel-Bulkley model,
- Ostwald model,
- Bingham model.

1.5.1. Herschel-Bulkley model

Tento model sa aplikuje na kvapaliny s nelineárnym správaním a medzou toku (τ_0). Herschel-Bulkleyovský model sa považuje za presný model, pretože jeho rovnica pozostáva z troch nastaviteľných parametrov (rovnica 6).

$$\tau = \tau_0 + K \cdot \dot{\gamma}^n \quad (6)$$

Parameter indexu konzistencie (K) poskytuje bližšiu predstavu o viskozite kvapaliny. Aby bolo možné porovnávať rôzne typy kvapalín, ktoré majú podobné tokové správanie, používa sa tokový index (n). Ak sa index toku blíži hodnote jeden, kvapalina má tendenciu prejsť z rednúcej do hustejšej kvapaliny. Pri hodnotách indexu toku okolo jeden, kvapalina pôsobí ako hustá. Podľa Herschel-Bulkley rovnice kvapalina vykazuje nasledujúce správanie [11]:

- $\tau_0 = 0$ a $n = 1 \Rightarrow$ newtonské správanie,
- $\tau_0 > 0$ a $n = 1 \Rightarrow$ binghamské správanie,
- $n < 1 \Rightarrow$ pseudoplastické správanie,
- $n > 1 \Rightarrow$ dilatantné správanie.

1.5.2. Ostwald model

Ostwald model je tiež známy ako model Power Law. Aplikuje sa na riedke kvapaliny, ktoré nevykazujú medzu toku (τ_0). Rovnica Ostwald modelu je popísaná v rovnici 7 [11].

$$\tau = K \cdot \dot{\gamma}^{(n-1)} \quad (7)$$

Podľa hodnoty n v rovnici sa jedná o tekutiny so správaním:

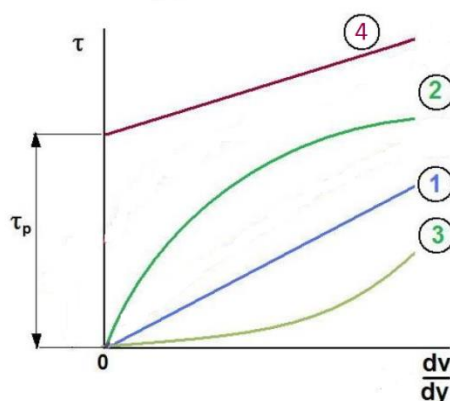
- $n < 1 \Rightarrow$ pseudoplastické správanie,
- $n = 1 \Rightarrow$ newtonské správanie,
- $n > 1 \Rightarrow$ dilatantné správanie.

1.5.3. Bingham model

Bingham model popisuje tokovú krivku kvapaliny s medzou toku a konštantnou viskozitou pri namáhaní nad medzu toku. Medza toku (τ_0) je šmykové napätie (τ) pri gradiente rýchlosti deformácie ($\dot{\gamma}$) a viskozita (η) je uhol krivky pri namáhaní nad medzu toku. Rovnica Binghamovho modelu je popísaná v rovnici 8 [11]. Podľa hodnoty medze toku sa kvapaliny rozdeľujú do nasledovných typov správania:

- $\tau_0 = 0 \Rightarrow$ newtonské správanie,
- $\tau_0 > 0 \Rightarrow$ binghamské plastické správanie.

$$\tau = \tau_0 + \eta \cdot \dot{\gamma} \quad (8)$$



Obr. 7 Porovnanie tokových kriviek jednotlivých správaní tekutín: 1. newtonská kvapalina, 2. pseudoplastická kvapalina, 3. dilatantná kvapalina, 4. binghamská kvapalina [7]

1.6. Meranie toku

Na meranie toku je nutné definovať veličiny, ktoré sa podieľajú na toku. Následne sa musia zvoliť vhodné podmienky na definovanie tokových vlastností. Model rovnobežných dosťičiek, ktorý je zobrazený na obrázku 3, pomáha lepšie si predstaviť a definovať šmykové napätie a gradient rýchlosti deformácie. Tieto údaje sa následne vyhodnocujú do tokových kriviek, čo je vlastne závislosť šmykového napätia na gradiente rýchlosti deformácie. Podľa týchto kriviek sa následne vyhodnocuje správanie vzorky a priradzuje sa jej príslušný model správania. Na meranie toku sa používajú reometre a viskozimetre [9].

1.7. Typy reometrov/viskozimetrov

Viskozita sa meria rôznymi typmi viskozimetrov a reometrov. Rozdiel medzi reometrom a viskozimetrom je ten, že reometre sa používajú na tie kvapaliny, ktoré nie je možné definovať len jednou hodnotou viskozity. Pri kvapalinách, ktoré sa merajú reometrom, sa pozoruje viac parametrov ako pri viskozimetre. Newtonské kvapaliny majú viskozitu konštantnú v širšom rozsahu šmykových rýchlostí. Nenewtonské kvapaliny zas nemajú konštantnú viskozitu v určitom rozsahu šmykových rýchlostí. Existuje viac druhov zariadení na meranie viskozity kvapalín a medzi základné patria napr.:

- prietokové viskozimetre,
- telesové viskozimetre,
- kapilárne viskozimetre,
- vibračné viskozimetre,
- rotačné viskozimetre.

Viskozita newtonských kvapalín je závislá len na teplote a tlaku, preto ju môžeme merať všetkými vyššie uvedenými zariadeniami. Meranie viskozity newtonských kvapalín je jednoduchšie ako meranie viskozity nenewtonských kvapalín. Medzi newtonské kvapaliny patria aj plyny. Pri nenewtonských kvapalinách nie je viskozita látkový parameter, preto je nutné merať celú tokovú krivku (reogram) kvapaliny. Zisťovanie tokových kriviek nenewtonských kvapalín je zložitá úloha, a to hlavne pri suspenziách. Pri suspenziách nestabilných je priam až nemožné zmerať tokovú krivku, pretože po čase dochádza k rozvrstveniu. Pre zisťovanie tokových kriviek nenewtonských kvapalín sú vhodné len viskozimetre kapilárne a rotačné. Rotačné

viskozimetre sú vhodné na meranie nízkych rýchlostí šmykových deformácií ($10^{-2} - 10^2 \text{ s}^{-1}$) a kapilárne sú vhodné na meranie v oblastiach stredných až vysokých rýchlostí šmykových deformácií ($10 - 10^3 \text{ s}^{-1}$). V nasledujúcej kapitole budú bližšie definované rotačné reometre [6, 7, 12].

1.8. Rotačné reometre

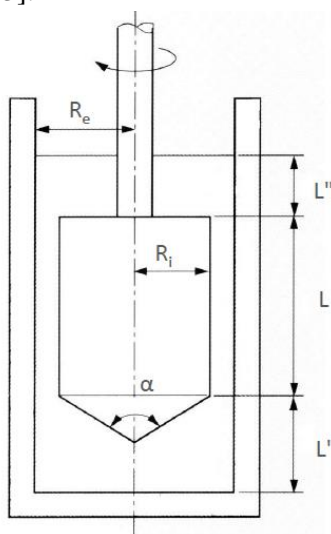
Tieto prístroje predstavujú prepracovanejšiu skupinu prístrojov, ktoré sú určené na charakterizáciu reologického správania širokého spektra materiálov. Tieto prístroje sú okrem merania viskozity schopné merať aj iné reologické veličiny ako napr. šmykové napätie, rýchlosť šmykovej deformácie, medzu toku v ustálenom šmykovom poli, viskoelastické moduly a komplexnú viskozitu v oscilačnom poli. Rotačné reometre pozostávajú z dvoch hlavných častí, a to z pohyblivej, ktorá sa volá rotor a zo statickej, ktorá sa volá stator. Medzi tieto dve časti sa umiestňuje vzorka. Obidve časti majú spoločnú os a môžu byť v troch rozdielnych geometriách a to:

- valec – valec,
- kužeľ – doska,
- doska – doska.

Každá z týchto geometrií je určená na meranie iných konzistencií materiálov [1].

1.8.1. Systém valec – valec

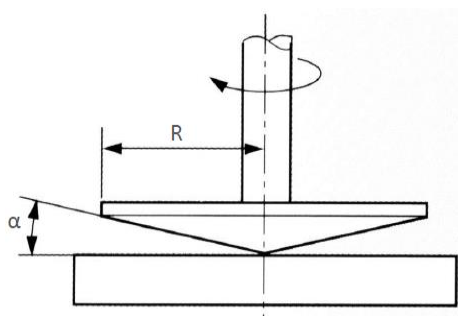
Tento systém pozostáva z meracieho telesa (vnútorný valec) a z odmerky (vonkajší valec). Oba valce majú spoločnú rotačnú os, keď je reometer v pracovnej polohe. Tento systém usporiadania sa používa predovšetkým na meranie nízko-viskózných kvapalín, pretože rotor má veľký povrch. Rozlišujú sa dva typy prevádzky, a to ak sa otáča vnútorný valec (Couette systém) a ak sa otáča vonkajší valec (Searle systém). Pri otáčaní valca je vzorka pod vplyvom šmyku medzi dvoma plochami valcov a vyhodnocuje sa brzdný účinok kvapaliny pri rôznych rýchlostiach otáčania sa jedného z valcov. Nevýhodou tohto usporiadania je, že v rôznych bodoch meranej kvapaliny je rôzna rýchlosť šmykovej deformácie. Ďalej sa musí počítať s tým, že vzorka sa počas merania zohrieva. Teplota vzorky závisí na rýchlosti otáčania jedného z valcov a taktiež na viskozite vzorky [2, 3, 13].



Obr.8 Schéma geometrie valec - valec [3]

1.8.2. Systém kužel – doska

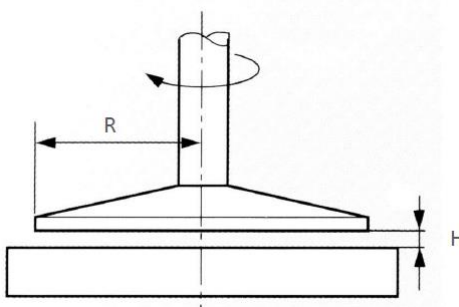
Už z názvu vyplýva, že tento systém pozostáva z dvoch častí, a to hornej časti, ktorá je v tvare kužele. Spodná časť je stabilná. Vo väčšine prípadov je kužel rotor a rozmery kónického povrchu sú dané polomerom kužele. Hlavnou výhodou tejto geometrie je, že deformačná rýchlosť nie je závislá od vzdialenosti od stredu dosky. Pri tomto usporiadaní sa vzorka vkladá do úzkej medzery medzi časťami, preto si pri meraní vystačíme už s malým množstvom skúmanej látky a táto geometria je veľmi ľahko čistiteľná. Temperovanie vzorky je veľmi účinné z dôvodu veľkej chladiacej plochy a tenkej vrstvy vzorky. Nevýhodou tohto usporiadania je, že nie je vhodné pre suspenzie, pretože veľké častice môžu narušovať tokové pomery v klinovej medzere. Toto usporiadanie je vhodné pre viskózne tekutiny a homogénne materiály. Táto geometria je vhodná aj na oscilačné meranie [2, 3, 13].



Obr. 9 Schéma geometrie kužel - doska [3]

1.8.3. Systém doska – doska

Usporiadanie geometrie doska-doska pozostáva z dvoch rovných dosiek. Hornú dosku tvorí rotor a spodná doska je pevne prichytená k stojanu. Geometria je určená polomerom dosky R . Táto geometria má nevýhodu v tom, že pri konštantnej rýchlosti otáčania nie je gradient rýchlosti deformácie konštantný po celej ploche dosky. Mení sa v závislosti R od stredu dosky. Znamená to, že šmyková rýchlosť je v určitej závislosti na polomere R . Táto nevýhoda má však význam pri definovaní reologických materiálnych hodnôt lineárnej viskoelasticity (G' , G''). Práve preto sa táto geometria často využíva na oscilačné meranie, hlavne ak sa analyzuje vzorka pri rozdielnych teplotách alebo ak vzorka obsahuje pomerne veľké častice. Táto geometria umožňuje väčšie polohy medzery H , preto môžeme minimalizovať javy, ktoré negatívne ovplyvňujú namerané hodnoty ako napr. tepelná rozťažnosť meracieho zariadenia či trecie účinky spôsobené časticami v medzere reometra [2, 3, 13].



Obr. 10 Schéma geometrie doska - doska [3]

1.9. Oscilačné merania

Oscilačné merania sú najviac používanou metódou na meranie vlastností viskoelastických materiálov. Princípom oscilačného merania je aplikácia rotácie na vzorku, čiže vzorka kmitá tam a späť. Najčastejšie sa aplikuje sínusová. Táto skúška je nedeštruktívna a získavajú sa vlastnosti vzorky pred deformáciou. Typická premenná, ktorá sa získava touto skúškou je šmykové napätie. Pri oscilačnom meraní sa meria:

- **Komplexný modul G^*** (rovnica 9):

$$G^* = \frac{\tau}{\gamma} \quad (9)$$

- **Modul elasticity G'** (rovnica 10):

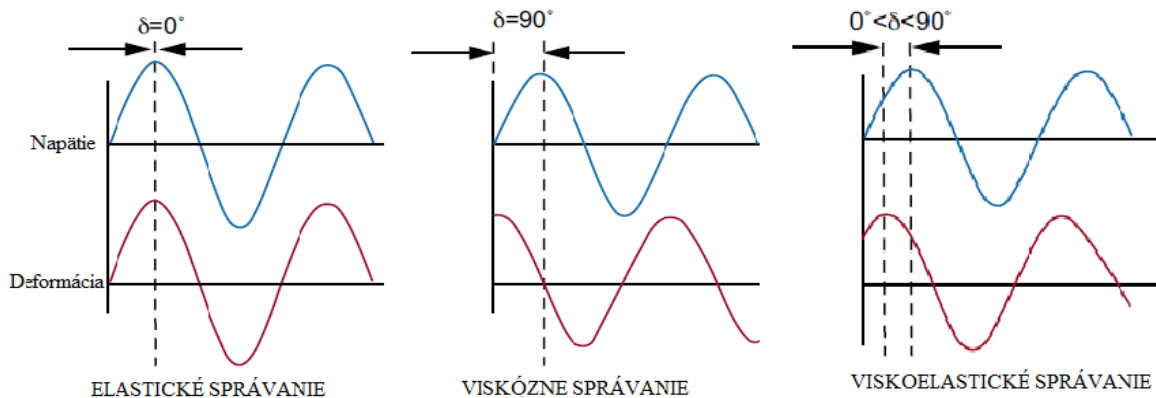
$$G' = G^* \cdot \cos \delta \quad (10)$$

- **Modul viskozity G''** (rovnica 11):

$$G'' = G^* \cdot \sin \delta \quad (11)$$

Fázový uhol δ

Ak sa $\delta = 0^\circ$ tak materiál vykazuje ideálne elasticke správanie a ak $\delta = 90^\circ$ tak sa materiál správa ako ideálne viskózne. Viskoelastické správanie vykazuje väčšina vzoriek s fázovým posunom medzi sínusovými krivkami ako je vidieť na obrázku 11.



Obr.11 Závislosť fázového uhla na správaní vzorky [15]

Fázový uhol sa vypočíta podľa vzorca:

$$\tan \delta = \frac{G''}{G'} \quad (12)$$

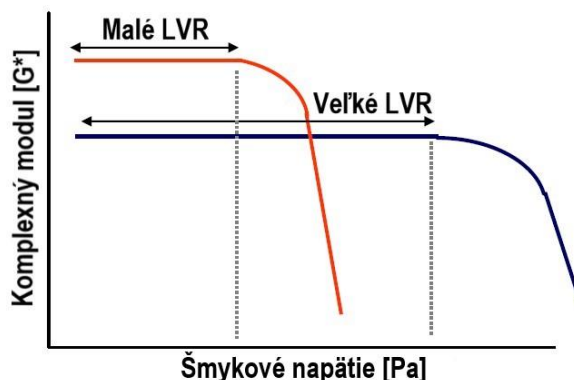
Oscilačné meranie môže prebiehať v dvoch režimoch. Prvý vyvoláva lineárnu viskoelastickú odozvu (malá amplitúda oscilácie, SAOS) a druhý režim vyvoláva nelineárnu materiálovú odozvu (veľká amplitúda oscilácie, LAOS). Viskoelastické veličiny sa merajú ako funkcie času, amplitúdy, frekvencie alebo času [13-16].

1.9.1. Oscilačné meranie – režim frekvencie

Pri tomto režime merania sa teplota a deformácia udržiavajú konštantné a sledujú sa viskoelastické vlastnosti pri zmene frekvencie. Frekvencia je inverzná voči času a krivka vykazuje mechanickú odozvu závislú na čase. Pri krátkom čase tzn. vysokej frekvencii odpovedá správanie vzorky správaniu tuhej látky. Pri dlhšom čase, čo odpovedá nízkej frekvencii, látka vykazuje správanie tekutiny. Frekvencia sa bežne používa v rozmedzí od 0,1 do 100 rad·s⁻¹. Veľkosť a tvar kriviek G' a G'' je závislá na molekulárnej štruktúre skúšaného materiálu [15].

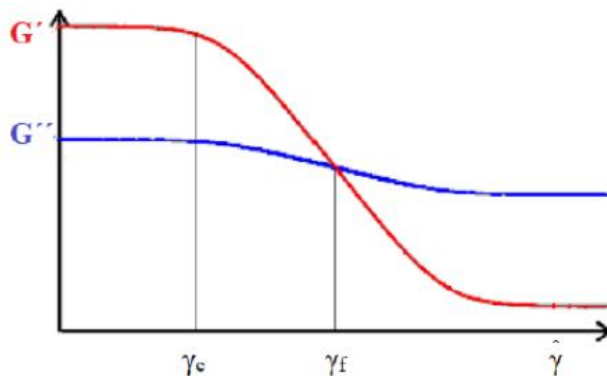
1.9.2. Oscilačné meranie – režim amplitúdy

Ak je reometer v režime napätia, tak zostáva frekvencia a teplota konštantná a viskoelastické vlastnosti sa zaznamenávajú pri zmene napätia. Na vzorku sa pôsobí sínusovým napätím. Týmto spôsobom sa nepretržite pôsobí na vzorku, ale takým spôsobom, aby sa neporušila štruktúra vzorky. Ak sa preťaží vzorka, jej štruktúra sa zničí, a preto sa musí udržiavať nízke napätie a pracovať v lineárnej viskoelastickej oblasti LVR. Na popis LVR sa najčastejšie používa režim amplitúdy a výsledný graf indikuje stabilitu štruktúry. Ak je štruktúra vzorky udržiavaná, tak je komplexný modul konštantný. Pri zvýšení napätia dochádza k porušeniu štruktúry a komplexný modul klesá, ako je možné vidieť na obrázku 12. Vzorka 2 na obrázku 11 má oveľa kratšie LVR ako vzorka 1, čo znamená, že sa vzorka 2 porušuje oveľa ľahšie. Dĺžka LVR je teda v oscilačnom meraní miera stability vzorky a všetky ďalšie oscilácie musia byť vykonané v LVR. Po určení LVR sa môže v režime amplitúdy definovať povaha materiálu [17].



Obr. 12 Zobrazenie lineárnej viskoelastickej oblasti LVR [16]

Ak sú sledované veličiny modul elasticity G' a modul viskozity G'' v závislosti na amplitúde deformácie $\hat{\gamma}$, látka po prekročení hodnoty, kedy je $G' = G''$, sa stáva kvapalinou. Tento bod sa nazýva aj bod toku a označuje sa γ_f (obrázok 13). V bode kritickej šmykovej deformácie, ktorá sa označuje γ_c (obrázok 13) sa mení pevná látka na gél. [29]



Obr. 13 Grafické znázornenie kritickej šmykovej deformácie γ_c a bod toku γ_f [29]

1.9.3. Oscilačné meranie – režim teploty

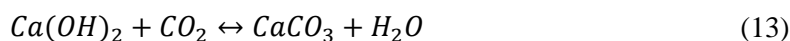
Meranie viskoelastických vlastností v intervale teplôt je mimoriadne citlivá technika na meranie hodnôt α alebo meranie teploty skelného prechodu T_g , či meranie akéhokoľvek β alebo γ prechodu materiálu. Na vzorky sa aplikuje lineárne ohrievanie, ktorého typická rýchlosť ohrievania je v intervale od 1°C do $5^\circ\text{C} / \text{min}$. Odozva materiálu sa sleduje na jednom alebo viacerých miestach frekvencie pri konštantnej amplitúde v rámci LVR. Údaje sa zhromažďujú vo vopred definovaných časových intervaloch. Na určenie prechodov sa používajú parametre ako elastický modul G' alebo viskózný modul G'' , prípadne fázový uhol δ [15].

1.9.4. Oscilačné meranie – režim času

Pri zachovávaní konštantnej teploty, deformácie a frekvencie, viskoelastické vlastnosti sa merajú ako funkcia času. Tento režim je dôležitý na sledovanie toho, ako sa materiálová štruktúra mení s časom. Používa sa na monitorovanie reakcií vytvrdzovania, štúdie únavy, prestavby štruktúry a na ďalšie časovo závislé deje v materiáloch [15].

2. Reológia vápenných mált

Vápno a hydraulické vápno sa používali až do začiatku tohto storočia vo väčšine stavieb a mnohé zotrávajú v dobrých podmienkach až dodnes, čo hovorí o ich kvalite. Avšak koncom 19. storočia sa stal portlandský cement a jeho deriváty hlavným spojivom v stavebníctve kvôli pravidelnosti ich výroby. S narastajúcim tlakom na obnovu historických pamiatok a záchranu nášho architektonického dedičstva sa obnovuje záujem o spojivá na báze vápna a narastá hlavne záujem o lepšie pochopenie jeho správania. Napriek dlhodobému používaniu vápenných omietok sú vedomosti o vápenných spojivách založené viac menej na empirických pozorovaniach z tradičnej praxe bez toho, aby bola dôkladne pochopená vedecká prax. Dôvod obnovy záujmu o vápenné malty bol, že cementové malty spôsobili vážne škody na budovách kvôli ich kompatibilitě s inými materiálmi (je príliš tuhy, tvrdý a nepriepustný). Cement oproti vápnu tiež obsahuje veľké množstvo nerozpustných solí, ktoré môžu vytvárať kryštalické tlaky a tým poškodiť budovy. Vápenné malty tvrdnú podľa chemickej rovnice 13. Počas tohto procesu sa mení mikroštruktúra a výsledkom je transformácia portlanditu na kalcit.



Reológia vápenných mált je jedna z najdôležitejších, ale menej zrozumiteľných vlastností vápna. Znalosť reológie v oblasti vápenných mált môže prispieť k pochopeniu správania sa čerstvých materiálov a vďaka reológii sa môžu bližšie predpokladať tokové vlastnosti čerstvých vápenných mált. Faktom je, že reologické správanie mált na báze cementu je viac preštudované ako tie na báze vápna. Pri znalosti tokových vlastností sa môže jednoducho určiť vhodnosť vápenných mált pre každú konkrétnu aplikáciu, a pri tom je to aj najlepšia kontrola vlastností. Okrem toho sa predpokladá, že vzťah medzi vlastnosťami v čerstvom a zatvrdnutom stave pomáha kontrolovať konečné vlastnosti malty. Vápenné malty sú nenewtonské kvapaliny, ktoré vykazujú reopetické alebo tixotropné správanie z časového hľadiska. Okrem toho vápenné malty sa správajú podľa Herschel-Bulkley modelu a sú vyjadrené hlavne tromi reologickými veličinami, a to medzou toku, koeficientom konzistencie a tokovým indexom podľa rovnice 14.

$$\tau = \tau_0 + K \cdot \dot{\gamma}^n \quad (14)$$

τ	šmykové napätie [Pa]
τ_0	medza toku [Pa]
K	koeficient konzistencie [Pa·s]
$\dot{\gamma}$	gradient rýchlosti deformácie [s ⁻¹]
n	tokový index [-]

Tento model je charakterizovaný tým, že na vápennú kašu alebo maltu sa musí pôsobiť vonkajším napätím, ktoré po prekročení začne látku pretvárať. Ak je kaša v pokoji, vznikajú medzi časticami suspenzie rôzne fyzikálne väzby. Pri pohybe kvapaliny dochádza k rozrušovaniu kvapaliny, ale zas pri ponechaní v pokoji, dochádza znova k zhlukovaniu častíc a vytvára sa do určitej miery koloidný gél, ktorý do určitej miery bráni deformáciám kaše tzn. že po skončení pôsobenia síl si kvapalina ponecháva svoj tvar. Táto vlastnosť sa nazýva plasticita a zabraňuje stekaniu malty pri nanášaní na zvislé povrchy alebo stropy. Avšak podmienkou je, aby hrúbka vrstvy nebola príliš hrubá, inak by sa prekročilo vnútorné napätie nad medzu toku. Medza toku

vápenných mált je až tri krát väčšia ako pri cementových maltách. Táto vlastnosť je najdôležitejšia pre murára a okrem toho by mala spracovateľnosť zotrvať niekoľko minút po aplikácii malty na materiál. Vápenná malta zotrváva v čerstvom stave len veľmi krátky čas v porovnaní s jej životnosťou. Musia sa brať v úvahu jej reologické vlastnosti, keďže majú veľký vplyv na jej použitie a na jej tvrdnutie. Jej vlastnosti v čerstvom stave určujú jednoduchosť jej nanášania, roztierania, vrstvenia, konečného upravovania a stupňa priľnavosti. Spracovateľnosť vápenných mált je ovplyvnená niekoľkými parametrami a to konkrétne pomerom spojiva a kameniva, vody a spojiva, obsahom zámesovej vody a množstvom prísad. Prísady ovplyvňujú vlastnosti čerstvej malty a pre vápenné malty sa používajú hlavne plastifikátory, prevzdušňujúce prísady a vodoretenčné prísady. V súčasnosti je bežné používať tieto prísady, ktoré sú vo všeobecnosti organickými substanciami, ktoré sa pridávajú do malty v malých množstvách.

Reológia vápenných spojív je rozhodujúca pre konečné správanie vápenných mált a omietok. Napriek tomu je reológia vápenných mált veľmi málo chápaná hlavne vo vzťahu k mikroštruktúre a koloidným vlastnostiam haseného vápna ($\text{Ca}(\text{OH})_2$). Na mikroštruktúru už vplýva výroba vápna napr. jeho kalcinácia, hasenie a starnutie. Tieto výrobné procesy ovplyvňujú mikroštruktúrne charakteristiky nehaseného vápna (CaO) a haseného vápna a tie následne ovplyvňujú spracovateľnosť, účinnosť a viskozitu mált na báze vápna. Viskozita pasty z haseného vápna závisí na mikroštruktúre nehaseného vápna, ktorá je daná hlavne kalcinačnými podmienkami. Tie vedú k výrobe buď mätko alebo tvrdo páleného vápna. Oba tieto produkty majú odlišné reologické správanie. Z mätko páleného vápna sa získava pasta s nízkou počiatočnou viskozitou a plasticitou, ktorá v priebehu času stúpa a po dostatočne dlhom odležaní vykazuje táto pasta vysokú plasticitu a viskozitu a tá vykazuje veľmi dobrú priľnavosť k podkladu. Pri tvrdo pálenom vápne sa získava jemná pasta s vysokou počiatočnou viskozitou a plasticitou, ktorá sa naopak v priebehu času znižuje a pasta riedne (dlhodobo však opäť dosahuje vyšších hodnôt). Z tohto pohľadu je vhodné aplikovať vápennú kašu z tvrdo páleného vápna ihneď po hasení a z mätko páleného vápna po dlhšom odležaní. Pridaním organických polyelektrolitov je možné predĺžiť pri pastách z tvrdo páleného vápna počiatočnú dobu jej vysokej viskozity a plasticity. Vo všeobecnosti hasené vápenné pasty vykazujú vyššiu plasticitu a spracovateľnosť ako tmely, ktoré sú pripravené zo suchého hydrátu. Ďalšie podmienky, ktoré ovplyvňujú reológiu vápennej pasty je pomer vody k obsahu oxidu a druh hasenia CaO (hasenie parou/vodou). [18–21, 27].

2.1. Vplyv kameniva na reológiu cementových mált

Pretože vplyv kameniva na reológiu vápenných mált nebol doteraz dostatočne preskúmaný, boli pre približný popis správania použité články o cementových maltách. Výsledky poukazujú na fakt, že veľké množstvo jemných častíc má výrazný vplyv na množstvo vody a spracovateľnosť malty pri použití drveného kameniva oproti použitiu riečneho kameniva. Drvené kamenivo obsahuje až okolo 15 % jemných podielov v porovnaní s riečnym kamenivom, ktoré obsahuje len okolo 1 % jemných podielov. V niektorých prípadoch je požiadavka na zámesovú vodu až v dvojnásobnom objeme v závislosti na vlastnostiach jemných podielov. Dôvod tohto javu je hlavne nepravidelný tvar častíc, jeho textúra a vysoké percento prítomnosti jemných častíc v drvenom kamenive. Toto zvýšenie množstva zámesovej vody môže byť do istej časti zmiernené použitím plastifikátora, alebo sa môže riečne kamenivo nahradiť drveným. Táto náhrada je možná len do 60 % objemu, aby sa dosiahla dostatočná spracovateľnosť betónu

alebo malty. Pri náhrade v tomto pomere sa dosahujú najlepšie výsledky pri skúške pevnosti v tlaku oproti náhradám v iných pomeroch.

Bola sledovaná plastická viskozita a medza toku pri použití drveného jemného kameniva. V rozdrvenom jemnom kamení sa nachádza veľké množstvo jemných častíc a častíc s nepravidelným tvarom, ktoré zvyšujú hlavne hodnoty medze toku a tiež prispievajú k zvýšeniu medzičasticového trenia, čo vedie zas k zvýšeniu hodnôt plastickej viskozity. Vplyv vlastností jemného kameniva je do značnej miery závislý na objeme pasty v malte. So zvýšením objemu pasty, sa tak môžu negatívne účinky nesprávne triedených a tvarovaných kamenív eliminovať alebo aspoň výrazne zmierniť [21].

2.2.Vplyv vodoretenčných prísad na reológiu čerstvých vápenných mált

Tieto prísady sa používajú predovšetkým vo vápenocementových alebo cementových omietkach. Majú schopnosť zadržiavať vodu a tým zvyšovať viskozitu vyrobenej zmesi. Prísady zlepšujúce viskozitu (viscosity enhancing admixtures - VEAs) ovplyvňujú súdržnosť, stabilitu a logicky viskozitu čerstvých mált. Kvôli týmto vlastnostiam sú dôležité napr. pre vodostavebné a samozhutiteľné betóny, pretože dokážu znižovať riziko segregácie a zabrániť nadmernému krvácaniu. Väčšina VEAs sú vo vode rozpustné biopolyméry s vysokou molekulovou hmotnosťou, ktoré dokážu minimalizovať pohyb vody a jemných častíc. V súčasnosti používané biopolysacharidy ako zahusťovadlá sú étery celulózy, welanová guma, diutánová guma, guaranová guma, xantánová guma a étery škrobu [26, 29].

2.2.1. Étery celulózy

Celulóza je dobre dostupným sacharidom na trhu. Je základnou stavebnou jednotkou bunkových stien rastlín, ktorá má vysokú pevnosť, netoxicitu, je bez zápachu a je bezfarebná. Jej éterifikáciou sa získavajú polysacharidy, ktoré upravujú spracovateľnosť, konzistenciu, spomaľujú tuhnutie, zlepšujú súdržnosť s podkladom, ale hlavne zadržujú vodu. Najviac používané étery celulózy sú hydroxypropylmethylcelulóza (HPMC), hydroxyethylmethylcelulóza (HEMC) a hydroxyethylcelulóza (HEC). Pri použití derivátu celulózy ako prísady do vápenných mált sa zvyšuje množstvo zámesovej vody o 22 % oproti obvyčajnej vápennej malte. Étery celulózy pri vyšších množstvách a nesprávnych dávkach nadmerne prevzdušňujú zmes, a tým znižujú výslednú pevnosť vápennej malty. Naopak, pri dodržanom dávkovaní sa pozoruje lepšia spracovateľnosť a plasticita. Prídavky éterov celulózy majú vplyv hlavne na reologické veličiny ako medza toku τ_0 , koeficient konzistencie K alebo tokový index n . Vápenné malty so zvyšujúcou sa koncentráciou éterov prechádzajú z tixotropného spávania do reopektického správania, ktoré je typické pre dilatantné kvapaliny. Dávkovanie éterov celulózy do vápenných mált nemá vplyv na medzu toku, ktorá je väčšinou požadovaná pri vápenných maltách kvôli priľnavosti malty na povrch. Plastická viskozita je pri vápenných maltách požadovaná kvôli lepšej priľnavosti zmesi a pri väčšine éteroch celulózy klesá, čo sa prejavuje ako nežiaduce. Ako najviac vhodná vodoretenčná prísada do vápenných pást sa javí HEC s dávkou 0,5 – 1,0 % a do vápenných mált je tiež vhodné použiť okolo 1 % HPMC [29].

2.2.2. Étery chitosanu

Chitosan sa získava katalyzovanou deacetyláciou chitínu. Chitosan je na rozdiel od chitínu rozpustný vo vode, ale je nerozpustný v alkalických médiách. To obmedzuje jeho použitie pri cementových alebo vápenných maltách. S eterifikáciou chitosanu sa zvyšuje rozpustnosť jeho derivátov. S nedávnymi štúdiami sa zistilo, že chitosan a jeho étery sú vhodné ako prísady do mált na báze cementu, ktoré zvyšujú viskozitu betónu, spomaľujú tvrdnutie a zvyšujú množstvo pórov. Ukázalo sa, že neiónové chitosánové étery nemajú až také výrazné účinky v porovnaní s iónovými étermi. Predmetom záujmu vo výskume Vyšvařila a kol. bol vplyv dvoch druhov chitosaninových éterov a to hydroxypropylchitosanu (HPCH) a karboxymetylchitosanu (CMCH) na vlastnosti čerstvých vápenných mált. Na základe výsledkov bolo preukázané, že so zvyšujúcim sa množstvom chitosanových éterov došlo k zvýšeniu obsahu vzduchu a retencie vody v čerstvých vápenných maltách. Pri skúške šmykového napätia sa s množstvom pridaného HPCH znižovala hodnota medze toku (τ_0) a koeficienta konzistencie (k), aj napriek dilatantnému správaniu malty. Naopak CMCH zvyšoval hodnotu medze toku, konzistenciu a malta vykazovala plastické a tixotropné správanie. CMCH má väčší vplyv na medzu toku a komplexný modul (G^*) ako na stratový modul v dôsledku so znížením fázového uhlu (δ). Z týchto výsledkov sa dá konštatovať, že CMCH má nízku účinnosť retencie vody. Naopak HPCH zvyšoval fázový uhol, čo nasvedčuje tomu, že sa zvyšuje gélový charakter malty, takže táto prísada má vysokú schopnosť zadržiavať vodu. [26]

2.2.3. Étery guaranovej gummy

Sú bežne používané ako prísady na ovplyvnenie reologických vlastností cementových a vápenných mált. Tieto prírodné polysacharidy alebo ich deriváty zvyšujú viskozitu, súdržnosť a stabilitu čerstvých mált. Hydroxypropylguar (HPG), karboxymethylhydroxypropylguar (CMHPG) sa využívajú hlavne v textilnom priemysle, pri vŕtaní a výrobe výbušnín. Získavajú sa z guaranovej gummy (GG). HPG je retenčná prísada, ktorá sa využíva na ovplyvnenie reologických vlastností materiálov na báze cementu. Vo vápenných maltách má HPG funkciu retencie vody, má zahusťovací účinok, zvyšujú medzu toku a jej správanie najviac imituje viskoelastické vlastnosti éterov škrobu. Ďalší éter guaranovej gummy CMHPG má vplyv na retenciu vody, hustotu zmesi, zvyšuje medzu toku a indukuje premenu na dilatantné správanie ako aj samotná guaranová guma. Tá podnecuje len vznik dilatantného správania, aj to len pri vyšších dávkach [30].

2.3. Vplyv plastifikátora na reológiu vápenných mált

S prídavkom plastifikátora do vápenných mált ich odolnosť voči toku klesá. Tento jav je ovplyvnený deflokuláciou zŕn a disperziou častíc. Vplyv plastifikátora je obzvlášť známy výrazným znížením medze toku, ktorý vykazuje prudký pokles. Medza toku sa výrazne znižuje s vyšším prídavkom plastifikátora a dlhším časom miešania. Nárast hodnôt medze toku je pozorovateľný až po dlhšej dobe miešania. Adsorpcia hydrofóbnej časti molekúl plastifikátora na povrchu častíc podporuje deflokuláciu a disperziu častíc. Ich prítomnosť na povrchu častíc vedie k menšiemu množstvu viazanej vody, pričom v okolitých filmoch zostáva viac vody voľnej.

To je dôvod prečo použitie plastifikátora znižuje množstvo zámesovej vody. Zníženie množstva zámesovej vody môže viesť k zlepšeniu mechanických vlastností [18].

2.4.Vplyv prevzdušňovacej prísady na reológiu vápenných mált

Prevzdušňovacie prísady vytvárajú vo vápenných maltách rovnomerne rozložené mikropóry, ktoré znižujú hustotu mokrých mált a zlepšujú spracovateľnosť. Vzduch obsiahnutý v materiáli zlepšuje tepelnoizolačné vlastnosti, ale zhoršuje pevnosť vytvrdnutého produktu. Pridaním prevzdušňovacej prísady do vápenných mált je ovplyvnená hlavne hodnota medze toku. Pri použití vyššieho množstva tejto prísady (0,1 hm. %) sa výrazne ovplyvní reologické správanie vápenných mált [18].

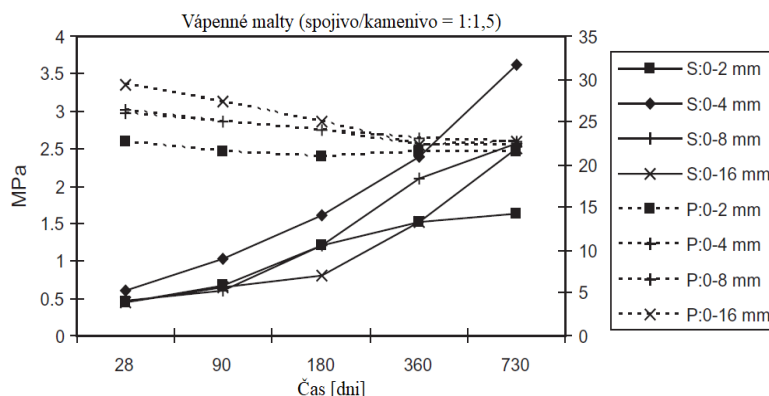
3. Vplyv kameniva na vlastnosti vápenných mált

V posledných rokoch je pozorovateľný čoraz väčší vplyv kameniva na vlastnosti mált. Rýchly nárast aktivity v stavebníctve za posledné desaťročia spôsobil vysoký nárast spotreby riečnych kamenív. Znižuje sa ich dostupnosť kvôli nadmernej spotrebe, a to má dopad na vyčerpanie prírodných zdrojov a na životné prostredie. Preto je dôležité hľadať alternatívy riečnych kamenív. V niektorých krajinách je dokonca zakázané ťažiť tento druh kameniva, hlavne kvôli tomu, aby sa znížila erózia vodného koryta, a aby toto kamenivo naďalej zohrávalo svoju filtračnú úlohu a filtrovalo tak podzemné vody.

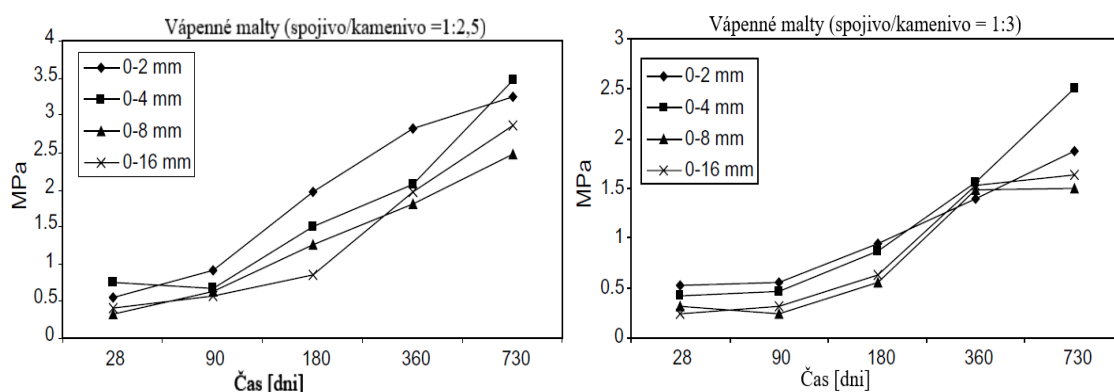
Vápenné malty pozostávajú z troch primárnych zložiek a to z vody, spojiva a kameniva, ktoré je vo väčšine prípadov kremičité. Kamenivo v malte má vplyv na vlastnosti malty, a to sa môže pripísať jeho mineralógii, tvaru, drsnosti povrchu a pórovitosti.

Kamenivo tvorí objemovo najväčšiu časť zmesi a jeho primárnou úlohou je znižovanie zmršťovania pri sušení, ktoré by mohlo viesť k nadmernému praskaniu malty. Experimentálne bolo zistené, že typ kameniva môže mať vplyv na zmrštenie pri vysychaní malty. V tomto experimente bol použitý dolomitický vápenec a bol porovnávaný s riečnym štrkom alebo s kremeňom. Bolo zistené, že malta z dolomitického vápenca má menšie zmrštenie sušením ako riečny štrk a kremeň [18].

Stefanidou a Papayianni robili výskum, v ktorom skúmali vplyv kameniva na štruktúru, správanie vápenných mált, vplyvu veľkosti zrna kameniva na pevnosť, pórovitosť a objemovú stabilitu. Kapilárna pórovitosť bola meraná ako indikátor odolnosti malty voči poveternostným vplyvom. Kamenivá vo vápenných maltách sa môžu líšiť mineralógiou, objemovým obsahom v zmesi, maximálnou veľkosťou zrna, čo môže značne ovplyvniť spojivovú maticu. Veľkosti zrn v maltách boli kedysi navrhované skôr empiricky a kamenivá sa používali v rôznych veľkostiach ako 0–4 mm, 0–12 mm, 0–16 mm a 0–40 mm v plynulom prechode, takže tieto malty boli často charakterizované ako betóny. V betóne je spojenie medzi kamenivom a pastou často definované ako slabá fáza hlavne kvôli vysokej pórovitosti, vzniku mikrotrhlín a rozdielnej veľkosti kryštálov spojiva. Rozdielny modul pružnosti kameniva a pasty ovplyvňuje vývoj mikrotrhlín na rozhraní týchto fáz. Veľké zrná kameniva bránia zmršťovaniu cementu a prebytočné napätie je absorbované na vytvorenie novej trhliny, ktorého výsledkom je zlyhanie betónu. Matrica vápenného spojiva je charakterizovaná vysokou pórovitosťou a nízkou pevnosťou v porovnaní s cementovou maticou. Vývoj pevností maltových zmesí s rôznym pomerom spojiva a kameniva sú uvedené na obrázku 13 a 14. Vápenné malty boli v rannom veku do 90 dní udržiavané vo vlhkom prostredí a hodnoty pevností boli nízke a to od 0,3–0,7 MPa. Najnižšie pevnosti vykazovali vzorky s hrubým kamenivom > 8 mm. Po vystavení vzoriek suchým podmienkam sa pevnosť vzoriek s hrubým kamenivom zväčšovala a tieto vzorky boli konkurencieschopné oproti ostatným vzorkám. To znamená, že zahrnutie hrubého kameniva do štruktúry vápennej malty je z dlhodobého hľadiska výhodné. Mikroskopické pozorovania štruktúry vápennej malty, poukazujú nato, že pri zvolenej nízkej frakcii kameniva sa trhliny tvorili väčšinou vo vápennej matici, naopak pri hrubej frakcii sa trhliny tvorili na rozhraní kameniva a vápennej fázy. Prítomnosť hrubého kameniva vo vápenných maltách pozitívne ovplyvňuje zmrštenie pri sušení. Taktiež zhutnenie mált s hrubým kamenivom má pozitívny vplyv na pevnosť a odolnosť voči poveternostným podmienkam. Nárast pevnosti zhutnených mált bol v prvých 90 dňoch o približne 15 % a po 180 dňoch až 30 % [23].



Obr. 14 Vývoj pevnosti a pórovitosti vo vápenných maltách v závislosti na čase pri rôznej granulometrii kameniva a pomere spojiva ku kamenivu 1:1,5 (S = pevnosť, P = pórovitosť) [23]



Obr. 15 Vývoj pevností vo vápenných maltách v závislosti na čase pri rôznej granulometrii a pomere spojiva ku kamenivu 1:2,5 (vľavo) a 1:3 (vpravo) [23]

V ďalšej štúdií bol skúmaný vplyv tvaru, priemernej veľkosti a obsahu kalcitu v kamenive na pevnosť, pórovitosť, absorpciu vody, hustotu a kapilárnu nasiakavosť slabo hydraulického vápenej malty. Už Rimanom bolo známe, že ak použijú do vápenej malty ostro-hranné piesky, dokážu získať vyššie pevnosti ako pri riečnych pieskoch. Pri použití malej veľkosti zrna riečného kameniva zvyšujeme pórovitosť malty, a tým pádom znižujeme aj výslednú pevnosť malty. Kapilárna nasiakavosť sa zvyšuje so zvyšujúcou sa veľkosťou zrna kameniva a najvyššie pevnosti dosahovali malty, ktoré mali kamenivo v rozmedzí frakcie medzi 0–4 mm. Okrem toho na výslednú pevnosť malty má vplyv viacero faktorov ako napr.: doba tvrdnutia, pomer spojiva ku kamenivu, pomer spojiva a vody, charakter, tvar a veľkosť kameniva a hutnenie vápenej malty. Ak sa použije kamenivo so širokým rozptylom veľkosti kameniva, môžu sa očakávať lepšie mechanické vlastnosti, zvýšenie objemovej hmotnosti, zníženie pórovitosti, absorpciu vody a kapilárnu nasiakavosť. Taktiež hranaté kamenivo použité vo vápenej malte môže zlepšiť mechanické pevnosti a znižuje pórovitosť, nasiakavosť a kapilárnu nasiakavosť. Pavía a Toomey tvrdia, že so zvyšujúcim sa obsahom kalcitu v kamenive má vápenná malta sklon k znižovaniu pevnosti v ohybe a tlaku [24].

Najbežnejším kamenivom používaným do mált je prírodný piesok, ktorý má vysoký obsah oxidu kremičitého. Aby sa nadmerne nevyčerpávali prírodné zdroje, je vhodné hľadať alternatívy, ktoré by znížili dopad ťažby na životné prostredie. Ako vhodný kandidát by mohol

byť práve vápenec, ktorý sa ťaží na prípravu vápna. Pri výrobe vápna vznikajú jednoznačne frakcie, ktoré nie sú vhodné na výpal. V historických omietkach sa vyskytujú ako aj jemné tak aj hrubé frakcie vápencového kameniva. Avšak jemné frakcie kameniva spôsobujú zvýšenie pórovitosti a teda aj zvýšenie nasiakavosti. So zvyšujúcou sa pórovitosťou však u vápenných omietok klesá mrazuvzdornosť [22].

Lanas a Alvarez robili výskum, na základe ktorého zistili, že ak sa použije vápencové kamenivo vo vápenných maltách, môže sa dosiahnuť vyššia pevnosť. Za tento jav môže byť považovaná podobnosť medzi spojivom a matricou, čo vedie k rovnomernejšej zmesi malty, a že v porovnaní s kremičitým kamenivom má vápencové kamenivo drsnejší a pórovitejší povrch. Za zmienku stojí aj fakt, že rôzne druhy vápenca majú inú štruktúru a iné rozloženie pórov. Napríklad pri použití oolitického vápenca do malty má malta vynikajúce vlastnosti v porovnaní s použitím bioklastického kameniva (tiež vápenaté) do malty. Taktiež použitie vápencového kameniva vyžaduje aj zvýšenie dávky zámesovej vody. Vo všeobecnosti vápenné malty dosahujú až dvojnásobné hodnoty pevnosti v tlaku od 28 dní až po rok vytvrdzovania. Ako bolo poukázané pri viacerých výskumoch, pri zvyšovaní pomeru spojiva k plnivu sa môžu doceliť vyššie pevnosti. Avšak so zvyšujúcim sa obsahom vápenného spojiva sa zvyšuje aj pórovitosť, a tým pádom klesá mrazuvzdornosť, zvyšuje sa nasiakavosť a kapilárna vztlínivosť. Taktiež s vysokým obsahom spojiva je spojený aj zvyšujúci sa výskyt zmršťovacích trhlin [25].

4. Experimentálna časť

Cieľom experimentálnej časti bolo skúmať vplyv kremenného, čadičového a vápencového kameniva s rôznou granulometriou na reologické správanie vápenných mált. Malty s rôznou granulometriou a rozdielnym typom kameniva mali rovnaký vodný súčiniteľ. Na popis reologického správania sa stanovovali reologické parametre pomocou rotačných a oscilačných skúšok.

4.1. Použité suroviny

4.1.1. Vápenný hydrát

Ako spojivo do vápenných mált bol použitý vápenný hydrát s komerčným označením biele vápno CL 90 - S, ktoré vyrába spoločnosť CARMEUSE CZECH REPUBLIC s.r.o v závode Mokrá. Jeho chemické zloženie je zobrazené v tabuľke 3.

4.1.2. Drvený vápenec

Drvený vápenec bol použitý ako plnivo do vápennej malty. Vyrába ho firma CEMEX Sand k.s. a pochádza z lomu Štramperk. Toto kamenivo sa ťaží v lomoch a následne sa drví na požadované frakcie, čomu odpovedá aj tvar zrna. Tvar zrna je zobrazený na obrázku 15. Boli použité frakcie 0–0,5 mm, 0–1 mm a 0–2,5 mm. Čiara zrnitosti je zobrazená na obrázku 18 a jeho chemické zloženie je uvedené v tabuľke 3.



Obr. 16 Mikroskopická snímka tvaru zrna drveného vápenca

4.1.3. Drvený čadič

Drvené čadičové kamenivo bolo použité v malte ako plnivo. Boli použité tri frakcie v intervaloch 0–0,5 mm, 0–1,0 mm a 0–2,5 mm. Toto kamenivo pochádza z lomu Dobkovičky

od firmy KÁMEN Zbraslav a.s. Čadičové kamenivo sa ťaží v lomoch, čomu odpovedá aj jeho tvar zrna. Mikroskopická snímka tvaru zrna je zobrazená na obrázku 16. Čiara zrnitosti je zobrazená na obrázku 18 a jeho chemické zloženie je uvedené v tabuľke 3.



Obr. 17 Mikroskopická snímka tvaru zrna drveného čadiča

4.1.4. Kremenný piesok

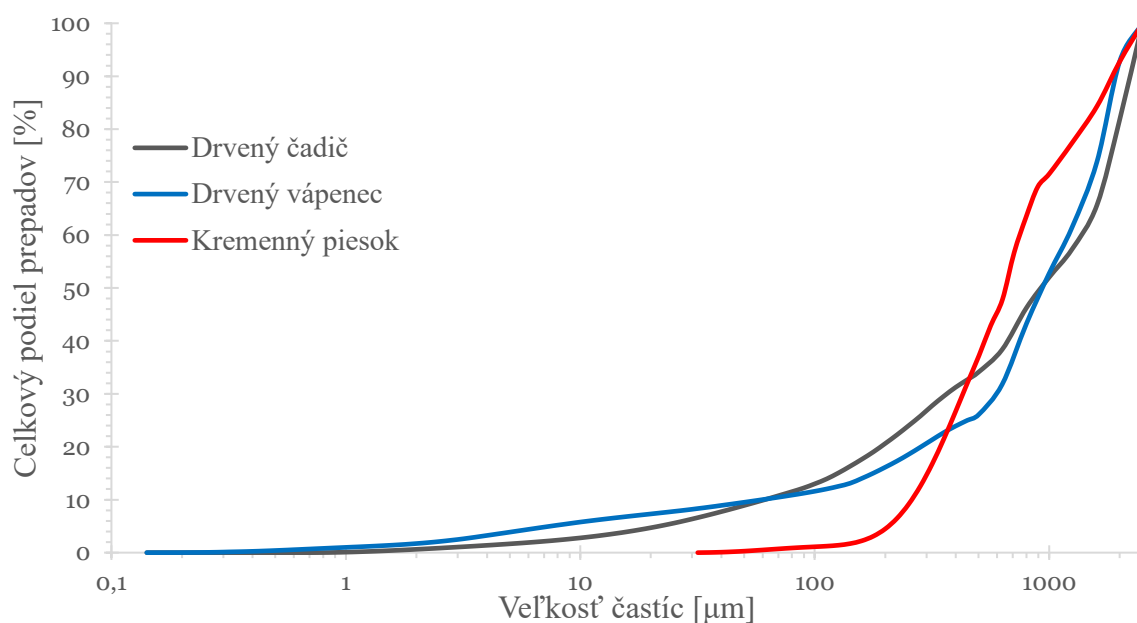
Kremenný piesok bol v malte použitý ako plnivo a jeho frakcie boli v intervaloch od 0–0,5 mm, 0–1,0 mm a 0–2,5 mm. Bol použitý piesok od firmy Českomoravský štěrk a.s. zo štrkopieskovne Hulín. Čiara zrnitosti je zobrazená na obrázku 18 a jeho chemické zloženie je uvedené v tabuľke 3.



Obr. 18 Mikroskopická snímka tvaru zrna kremenného piesku

Tab. 3 Chemické zloženie vápna CL90 – S, drveného vápenca, čadiča a kremenného piesku

Oxid	Obsah oxidov [%]			
	Vápno CL90 - S	Drvený čadič	Drvený vápenec	Kremenný piesok
CaO	68,09	9,85	51,03	0,53
SiO ₂	1,34	45,4	1,76	86,80
Al ₂ O ₃	1,21	10,8	0,95	6,46
Fe ₂ O ₃	0,39	11,6	0,22	1,15
SO ₃	0,02	0,10	0,05	0,06
MgO	0,38	9,39	0,45	0,31
Na ₂ O	0,00	0,00	0,05	0,94
K ₂ O	0,02	2,74	0,76	2,25
MnO	0,03	1,08	0,15	0,03
TiO ₂	0,14	0,27	0,08	0,17
Cr ₂ O ₃	0,08	0,63	0,03	-
P ₂ O ₅	0,05	0,64	0,27	0,04
Strata žihaním	27,88	0,76	42,77	1,32



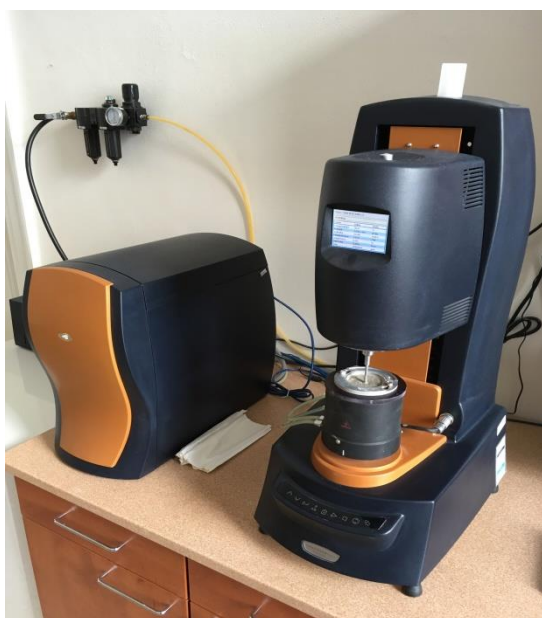
Obr. 19 Čiara zrnitosti čadičového, vápencového a kremenného kameniva

4.2. Použité skúšobné zariadenia

4.2.1. Rotačný reometer

Tokové a viskoelastické vlastnosti jemnozrnných vápenných mált boli merané pomocou rotačného reometra Discovery HR – 1 od firmy TA Instruments, ktorý je zobrazený na obrázku 19. Pre meranie bola zvolená geometria BMC (building material cell – cela pre stavebné materiály). Statická časť meranej geometrie sa nazýva stator a do nej sa umiestňovala vzorka. Pozostával zo štrbinovej kliečky vhodnej veľkosti na miešanie stavebných materiálov a umožňovala jednoduché čistenie. Druhá časť statoru pozostávala z Peltierho plášt'u, ktorý umožňoval presné temperovanie teploty.

Na meranie reologických vlastností slúžil rotor, ktorý bol lopatkového tvaru. Celá geometria bola z ocele a podporovala primerané miešanie vzoriek, pričom zabráňovala sklznutiu vzorky na povrchu rotora aj statora.



Obr. 20 Vľavo rotačný reometer Discovery HR – 1, vpravo použitá geometria [29]

4.3. Príprava vzoriek

Príprava vzoriek spočívala najprv v príprave kameniva. Všetky druhy kameniva boli presievane cez sita s D_{max} 0,5 mm, 0,1 mm a 2,5 mm. Po získaní požadovaného množstva kameniva sa stanovovala čiara zrnitosti (obrázok 15) na laserovom analyzátore a sypné hmotnosti jednotlivých druhov a frakcií kameniva (tabuľka 5). Na základe predpokladu, že vápenná malta s vápencovým kamenivom frakcie 0–0,5 mm bude mať najvyššiu viskozitu sa na nej stanovoval vodný súčiniteľ skúškou stanovenia konzistencie malty pomocou strásacieho stolčeka podľa ČSN EN 1015-3 [31]. Hodnoty rozliatia, vodného súčiniteľa a zloženie malty je zobrazené v tabuľke 4. Následne stanovený vodný súčiniteľ bol použitý pre všetky skúšané malty.

Tab. 4 Namerané hodnoty rozliatia a hodnota vodného súčiniteľa

Vápno CL90 - S [g]	Drvený vápenec 0-0,5 mm[g]	Voda [g]	Požadované rozliatie [mm]	Namerané rozliatie [mm]	Priemer [mm]	w
150	440	210	160	159,25	161,47	1,4
				163,68		

Tab. 5 Sypné hmotnosti a zloženie jednotlivých mált s rozdielnym druhom kameniva a frakcie
(Č – drvený čadič, V – drvený vápenec, K – kremenný piesok)

Označenie vzorky	Sypné hmotnosti		Zloženie malty objemovo [spojivo : plnivo (1 : 1)]		
	Sypná hmotnosť ρ_{kameniva} [kg·m ⁻³]	Sypná hmotnosť $\rho_{\text{Ca(OH)}_2}$ [kg·m ⁻³]	Voda [g]	Plnivo [g]	Spojivo (Vápno CL 90 - S) [g]
Č 0,5	1610	466	98	241,85	70
Č 1,0	1740			261,37	
Č 2,5	1920			288,41	
V 0,5	1370			205,79	
V 1,0	1530			229,83	
V 2,5	1560			234,33	
K 0,5	1490			223,82	
K 1,0	1550			232,83	
K 2,5	1620			243,35	

Po stanovení hodnoty vodného súčiniteľa sa navázili suché zložky malty v objemovom pomere spojiva a plniva 1 : 1. Tieto zložky sa premiešali a do takto pripravenej zmesi sa pridávala voda. Po pridaní vody do zmesi sa začal merať čas, aby doba miešania a ukladania malty do rotačného reometra bola 5 minút.

4.4. Použité skúšobné metódy

4.4.1. Stanovenie tokových vlastností

Táto skúška sa robila na rotačnom reometri. Pomocou tejto skúšky sa stanovovali tokové krivky, čo je závislosť šmykového napätia τ na rýchlosti šmykovej deformácie $\dot{\gamma}$. Najprv sa vzorka v reometri rozmiešala rýchlosťou 100 s⁻¹ a ponechala sa na 60 s v kľude. Následne lopatka rotoru analyzovala vzorku vzrastajúcou rýchlosťou šmykovej deformácie od 0,1 do 100 s⁻¹ a merala 30 bodov. Potom lopatka rotoru merala šmykové napätie klesajúcou rýchlosťou šmykovej deformácie od 100 do 0,1 s⁻¹ a taktiež merala 30 bodov. Úlohou bolo analyzovať tieto krivky pomocou Hershel-Bukley modelu na klesajúcich krivkách a stanoviť na nich medzu toku τ_0 , čo je hodnota šmykového napätia, kedy prechádza látka z elastického do tokového správania. Ďalej sa stanovoval koeficient konzistencie K , ktorý poskytuje bližšiu predstavu o viskozite kvapaliny. Poslednou meranou veličinou bol index toku n , ktorý popisuje tokové správanie.

Na vápenných maltách s kamenivom z drveného vápenca sa stanovovala aj závislosť šmykového napätia na čase, pretože bolo zistené, že vzorka v čase tuhne. Meranie prebiehalo 7200 sekúnd pri konštantnej šmykovej rýchlosti 10 s⁻¹. Aj pri tomto meraní bolo predmiešanie 60 sekúnd a meranie prebiehalo pri teplote 20 °C.

4.4.2. Stanovenie viskoelastických vlastností

4.4.2.1. Oscilačné meranie – režim amplitúdy

Pri tejto skúške bol reometer nastavený do amplitúdového režimu. V tomto režime zostáva frekvencia konštantná a bola nastavená na 1 Hz. Teplota bola taktiež konštantná a bola nastavená na 20 °C. Po pripravení vzorky sa vložila do reometra a rozmiešala po dobu 60 sekúnd a nechala sa v pokoji. Potom sa spustilo vlastné meranie, kedy lopatka rotora vykonávala otáčavý pohyb a na vzorku pôsobila sínusovým napätím. Amplitúdová deformácia bola nastavená v intervale od 0,001 do 100 %.

Pri tejto skúške sa stanovuje lineárna viskoelastická oblasť (LVR), ktorá nám definuje, kedy je vzorka stabilná a nezničí sa jej štruktúra. Tento bod sa nazýva kritická šmyková deformácia a vtedy vzorka prechádza z tuhej látky na gél. Vzorka je stabilná, ak má komplexný modul konštantný priebeh. Pri tejto skúške sa meral modul elasticity G' a modul viskozity G'' v závislosti na amplitúde deformácie γ .

4.4.2.2. Oscilačné meranie – režim frekvencie

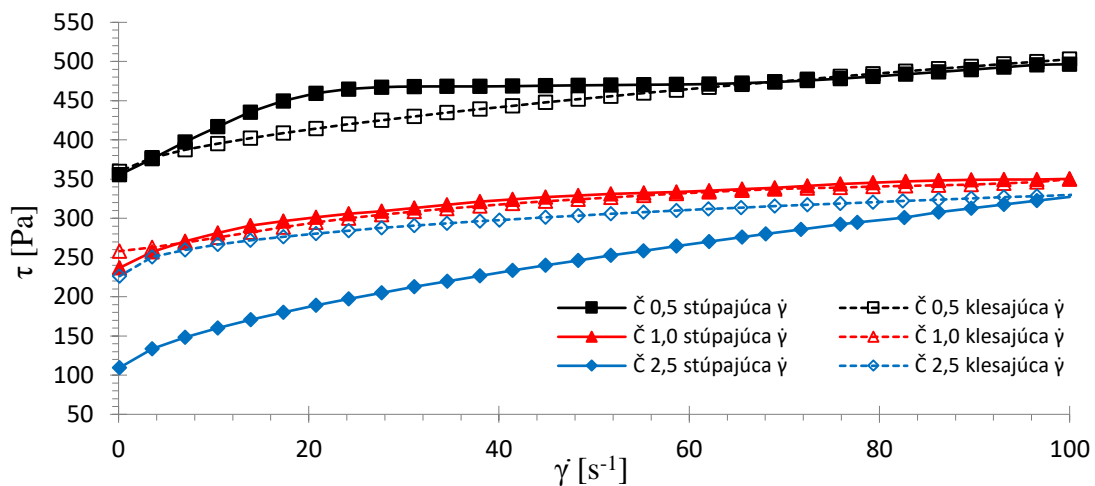
Táto skúšobná metóda bola taktiež meraná na rotačnom reometri. Tento režim merania na reometri bol nastavený hneď po ukončení amplitúdového merania na tej istej vzorke. Reometer temperoval teplotu vzorky na 20 °C a nasledovalo rozmiešanie vzorky rýchlosťou deformácie 100 s⁻¹ po dobu 30 sekúnd. Nasledovalo vlastné meranie kde bola nastavená frekvencia v intervale od 0,1 do 10 Hz a bolo meraných 30 bodov. Sledované parametre boli komplexný modul G^* a stratový faktor $\tan(\delta)$, pri ktorom so znižujúcou sa hodnotou sa zvyšovala tuhosť látky.

4.5. Výsledky a diskusia

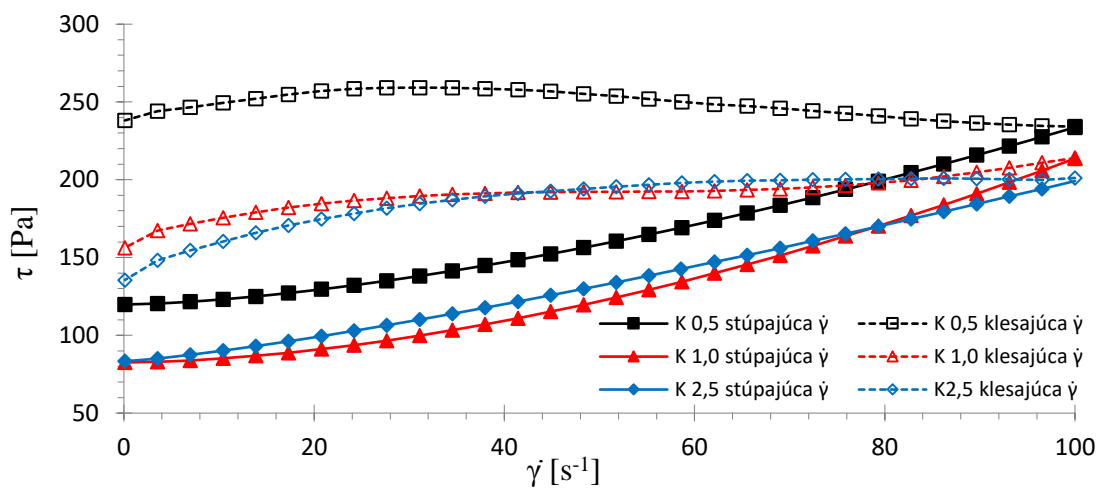
4.5.1. Tokové vlastnosti

Tokové vlastnosti vápenných mált s rôznym druhom kameniva sú vyhodnotené pomocou tokových kriviek. Na obrázkoch 21-27 boli porovnávané tokové krivky vápennej malty s čadičovým, vápencovým a kremenným kamenivom. Na obrázkoch 21-23 sú porovnávané malty s rovnakým kamenivom rozdielnej frakcie. Na obrázkoch 24-26 sú porovnávané malty s rôznym druhom kameniva rovnakej frakcie a na obrázku 27 je porovnanie klesajúcich tokových kriviek všetkých skúšaných vápenných mált. Z každého kameniva boli analyzované frakcie 0-0,5 mm, 0-1,0 mm a 0-2,5 mm.

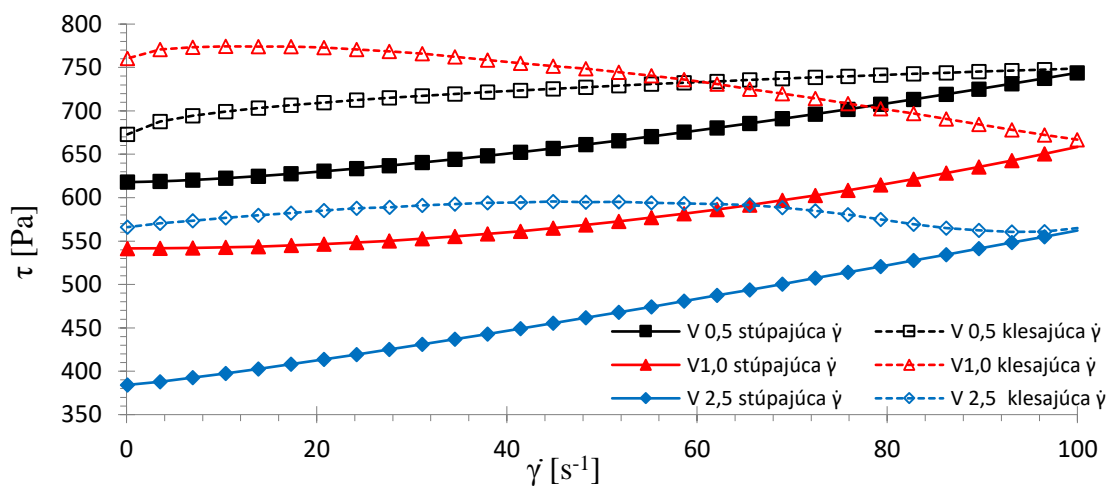
Na obrázku 21 sú porovnávané vápenné malty s čadičovým kamenivom rôznych frakcií, pri ktorých bol pozorovaný prechod z tixotropného do reopektického správania so zväčšujúcou sa frakciou kameniva. Malty s kremenným pieskom a vápencovým kamenivom (obrázok 22-23) vykazovali správanie reopektické, čo znamená, že v čase sa zahusťovali. Pri všetkých maltách bol pozorovaný nárast šmykového napätia s rastúcou rýchlosťou deformácie. Najvyššie hodnoty šmykového napätia boli dosiahnuté pri vzorkách s najnižšou frakciou kameniva, ktoré sa znižovalo so zvyšujúcou sa frakciou. Toto neplatilo pre maltu s vápencovým kamenivom, pretože frakcia 0-1,0 mm dosahovala vyššie hodnoty šmykového napätia ako malta s kamenivom frakcie 0-2,5 mm.



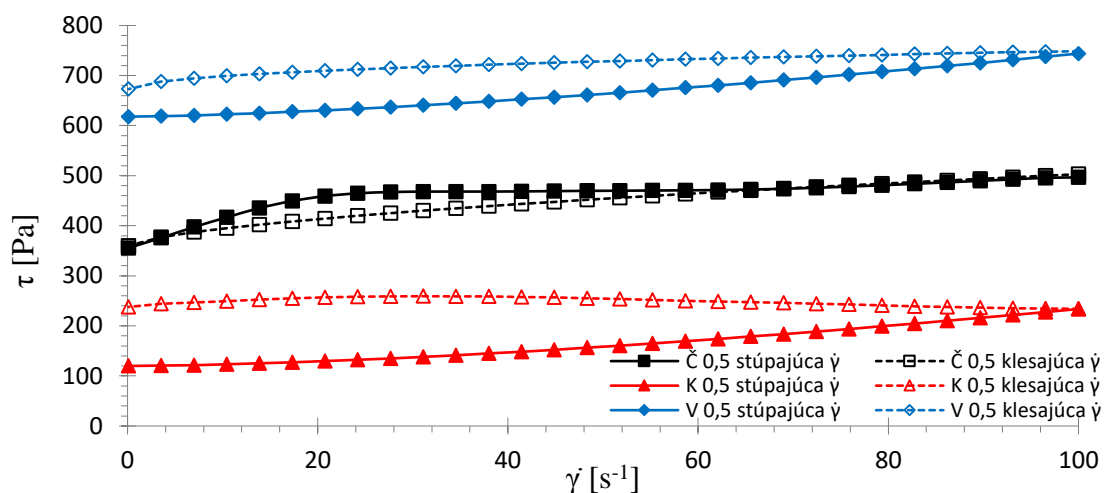
Obr. 21 Toková krivka vápennej malty s čadičovým kamenivom rôznej frakcie (Č – drvený čadič)



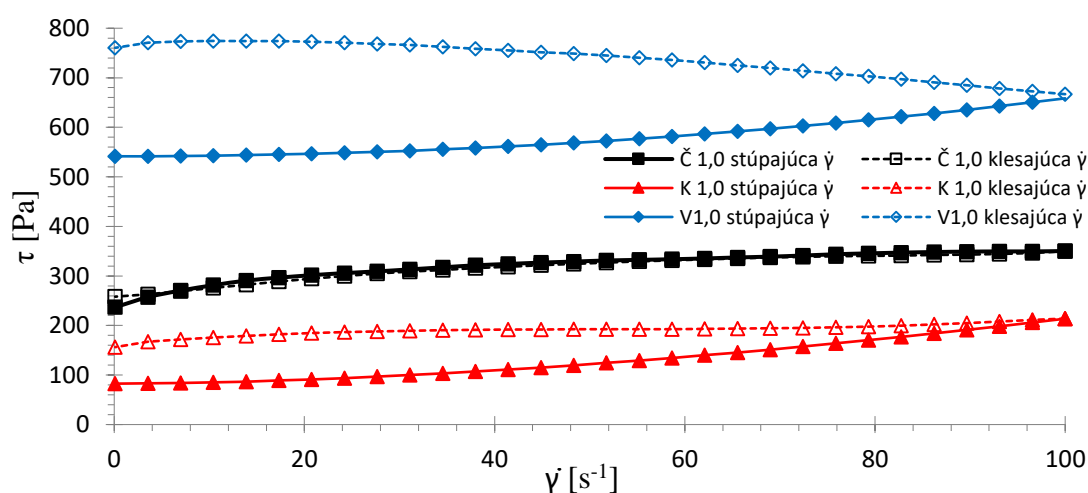
Obr. 22 Toková krivka vápennej malty s kremenným pieskom rôznej frakcie (K – kremenný piesok)



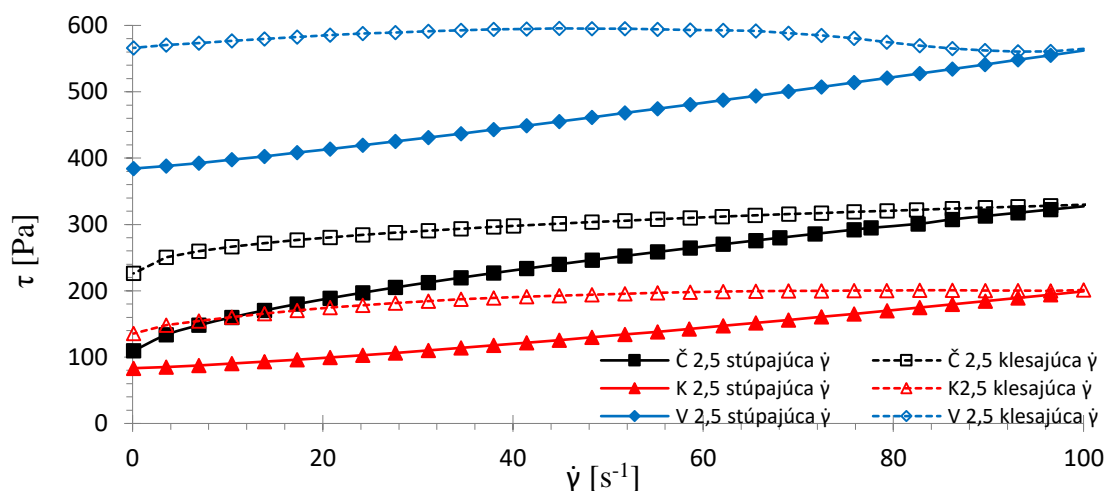
Obr. 23 Toková krivka vápennej malty s vápencovým kamenivom rôznej frakcie (V – drvený vápenc)



Obr. 24 Toková krivka vápennej malty s rôznym kamenivom frakcie 0,5 mm (Č – drvený čadič, V – drvený vápenec, K – kremenný piesok)



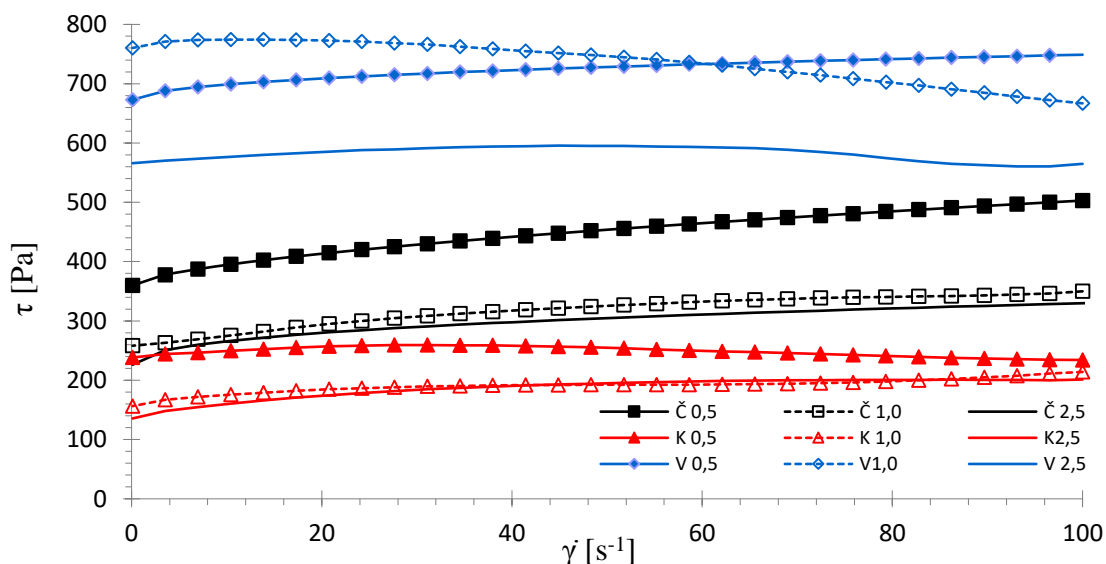
Obr. 25 Toková krivka vápennej malty rôznym kamenivom frakcie 1,0 mm (Č – drvený čadič, V – drvený vápenec, K – kremenný piesok)



Obr. 26 Toková krivka vápennej malty rôznym kamenivom frakcie 2,5 mm (Č – drvený čadič, V – drvený vápenec, K – kremenný piesok)

Tab. 6 Hodnoty medze toku τ_0 , koeficientu konzistencie K a indexu toku n všetkých skúšaných vápenných mált (Č – drvený čadič, V – drvený vápenec, K – kremenný piesok)

Označenie vzorky	τ_0 [Pa]	K [Pa·s]	n [-]
Č 0,5	357,54	9,36	0,60
Č 1,0	246,85	11,17	0,49
Č 2,5	217,12	21,05	0,36
K 0,5	236,72	3,73	0,54
K 1,0	153,00	8,40	0,43
K 2,5	127,20	14,31	0,39
V 0,5	668,80	11,07	0,43
V 1,0	–	–	–
V 2,5	564,18	3,42	0,59



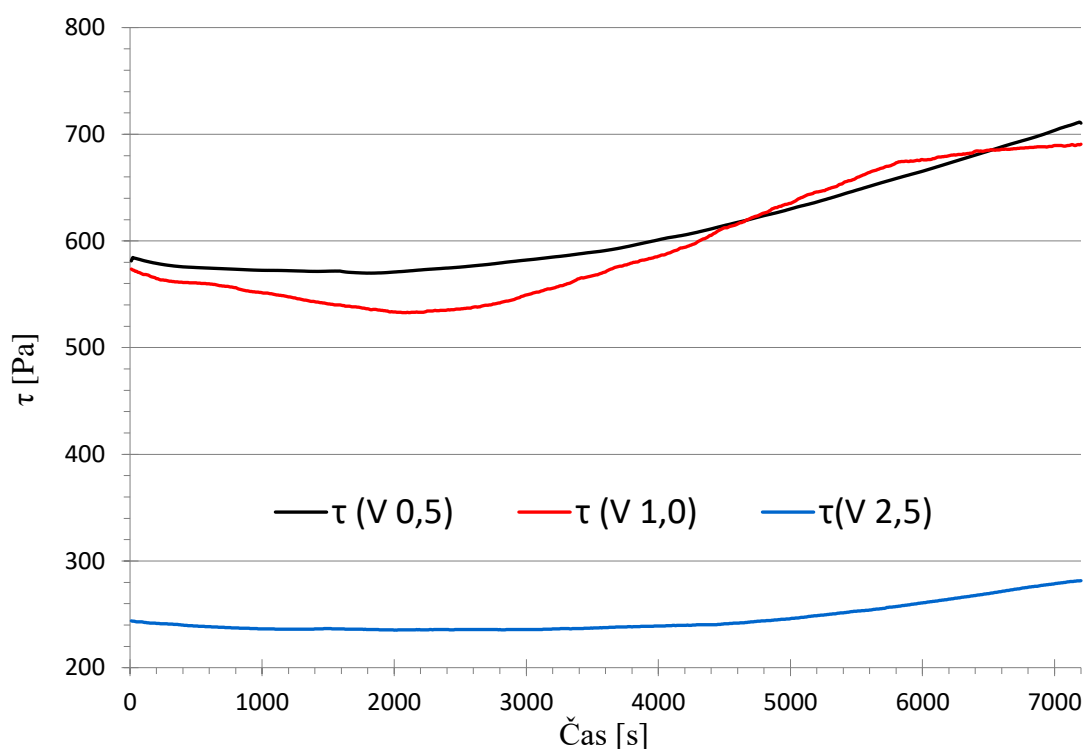
Obr. 27 Porovnanie klesajúcich tokových kriviek všetkých skúšaných vápenných mált (Č – drvený čadič, V – drvený vápenec, K – kremenný piesok)

Medza toku τ_0 dosahovala najvyššie hodnoty pri malte s vápencovým kamenivom frakcie 0,5 mm a to 668,80 Pa (tabuľka 6). Medza toku sa znižovala so zvyšujúcou sa veľkosťou kameniva. Najnižšiu hodnotu medze toku 127,20 Pa vykazovala malta s kremenným pieskom frakcie 2,5 mm. Malta s čadičovým kamenivom mala hodnoty medze toku približne o 100 Pa viac ako malta s kremenným pieskom.

Koeficient konzistencie K dosahoval najvyššie hodnoty pri maltách s čadičovým kamenivom. Najvyššiu hodnotu mal pri frakcii 0-2,5 mm a to 21,05 Pa·s. Nízke hodnoty koeficientu konzistencie mált s kremenným pieskom boli spôsobené hladkým, guľatým tvarom zrna tohto kameniva.

Index toku n bol pri všetkých skúšaných maltách nižší ako 1, čo znamená že všetky skúšané malty sa správali pseudoplasticky, takže sa vzorky so zvyšujúcou rýchlosťou deformácie zriedňovali a ich viskozita sa znižovala. Z dôvodu stúpajúceho priebehu tokovej krivky malty s vápencovým kamenivom frakcie do 1 mm pri znižujúcej sa šmykovej rýchlosti nebolo možné jej vyhodnotenie pomocou Hershel-Bulkley. Táto malta tuhla v čase, čo sa prejavovalo

práve zvyšovaním hodnôt šmykového napätia pri znižujúcej sa šmykovej rýchlosti. Na základe tohto zistenia boli malty s vápencovým kamenivom podrobené meraniu zmien šmykového napätia v čase pri konštantnej rýchlosti deformácie (obrázok 28). Bolo zistené, že malta s vápencovým kamenivom frakcie do 1 mm naozaj tuhne najskôr. Pri tejto vápennej malte dochádza k najrýchlejšiemu vytváraniu väzieb medzi spojivom a kamenivom. Dôvodom môže byť práve ideálne množstvo spojiva, ktoré dokonale obalí všetky zrná kameniva. Pri použití kameniva s menšiou veľkosťou častíc nie je v systéme dostatok tekutého spojiva k ideálnemu pokrytiu povrchu všetkých zŕn kameniva a nedochádza tak k vzniku interakcií medzi spojivom a kamenivom v takej miere. Naopak pri použití kameniva s väčšími zrnami je v systéme nadbytok spojiva a malta je preto tekutejšia a pomalšie tuhne. Tento jav bol pozorovateľný pri vápencovom kamenive pravdepodobne z dôvodu jeho najvyššej nasiakavosti, ostro-hranného charakteru a trochu vyššieho zastúpenia jemných častíc (obrázok 19).



Obr. 28 Grafické zobrazenie vývinu šmykového napätia v čase pri konštantnej rýchlosti deformácie vápennej malty s vápencovým kamenivom

4.5.2. Oscilačné meranie – režim amplitúdy

Na obrázkoch 28-30 sú porovnávané vápenné malty rôznych frakcií čadičového, vápencového kameniva a kremenného piesku. Na obrázkoch 31-33 sú porovnávané jednotlivé frakcie použitých kamenív. Boli porovnávané elastické G' a viskózne G'' moduly v závislosti na amplitúde deformácie $\hat{\gamma}$.

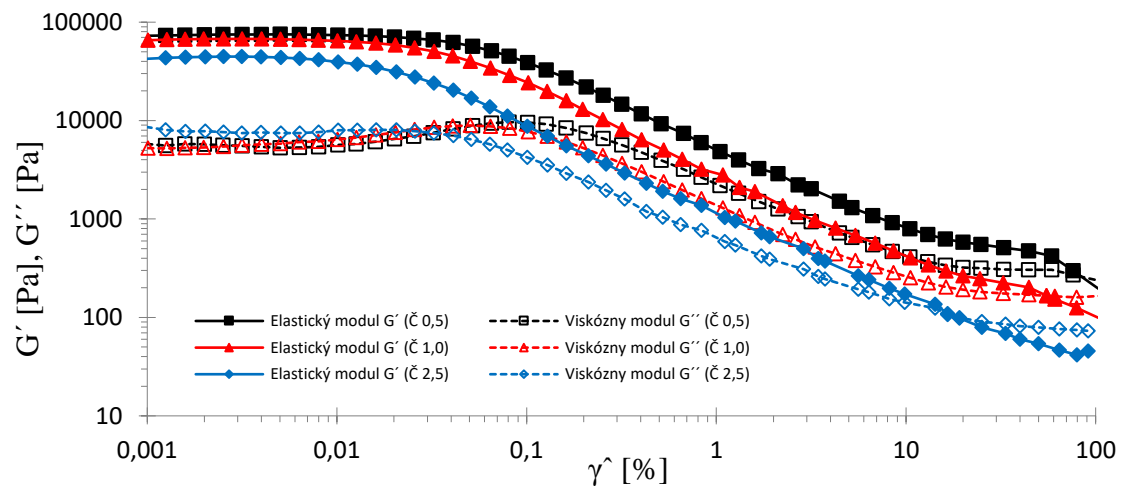
Vápenné malty vykazovali najvyššie hodnoty elastického modulu pri frakcii 0,5 mm, čo znamená, že systém bol najviac tuhý. Najviac tuhé vzorky boli s kamenivom z drveného vápenca a naopak najtekutejšie boli malty s kremenným pieskom. Najnižšie hodnoty G' boli dosiahnuté pri kamenivách s najvyššou frakciou 2,5 mm.

V tabuľke 7 sú hodnoty γ_{LVR} , ktoré vypovedajú o tom, dokiaľ je štruktúra vzorky stabilná. Malty s kamenivom z kremenného piesku majú približne rovnakú dĺžku LVR pri všetkých použitých frakciách. Pri maltách z drveného kameniva vápencového alebo čadičového sa dĺžka LVR postupne znižuje so zvyšujúcou sa frakciou kameniva a najdlhšiu LVR mala malta s čadičovým kamenivom frakcie 0,5 mm a to 0,016 %.

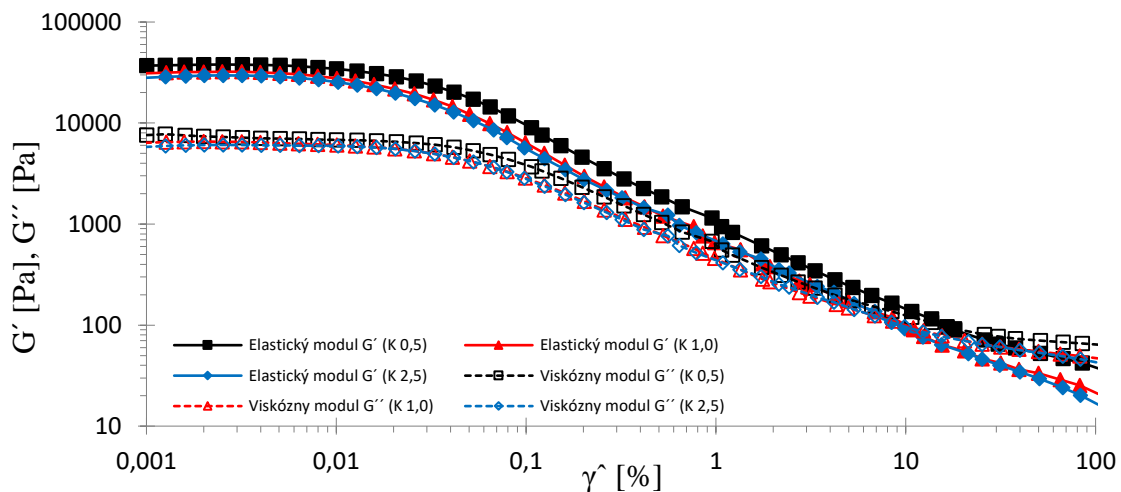
Bod toku γ_f je priesečník modulov elasticity a viskozity. Od tohto bodu sa látka správa ako kvapalina. Hodnoty bodov toku pre jednotlivé vápenné malty s rôznym druhom kameniva sú zobrazené v tabuľke 7. Najvyššia hodnota 84,03 % bola zaznamenaná pri malte s čadičovým kamenivom s najnižšou skúšanou frakciou a to 0,5 mm. Najnižšie hodnoty boli namerané pri malte s kamenivom z kremenného piesku, čo znamená, že malta sa najskôr správala ako kvapalina. Pri všetkých vzorkách sa hodnota γ_f so zvyšujúcou sa frakciou znižovala. Najviac tuhý systém vykazovali malty s čadičovým a vápencovým kamenivom.

Tab. 7 Tabuľka nameraných hodnôt lineárnej viskoelastickej oblasti LVR γ_{LVR} a bodov toku γ_f vápenných mált s rôznym druhom kameniva (Č – drvený čadič, V – drvený vápenec, K – kremenný piesok)

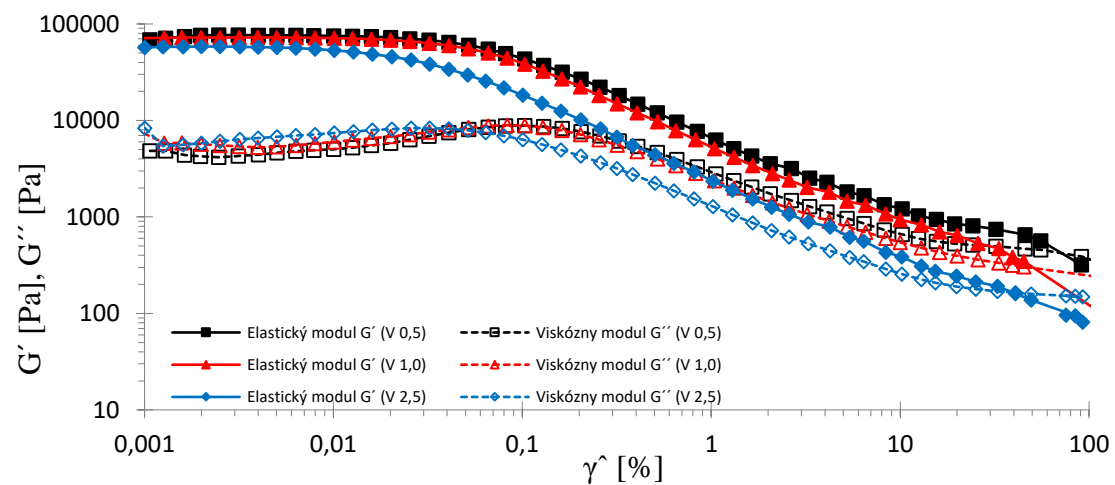
Označenie vzorky	γ_{LVR} [%]	γ_f [%]
K 0,5	0,006	18,13
K 1	0,005	9,91
K 2,5	0,005	8,57
V 0,5	0,015	72,05
V 1	0,013	50,89
V 2,5	0,006	39,53
Č 0,5	0,016	84,03
Č 1	0,008	55,47
Č 2,5	0,007	18,44



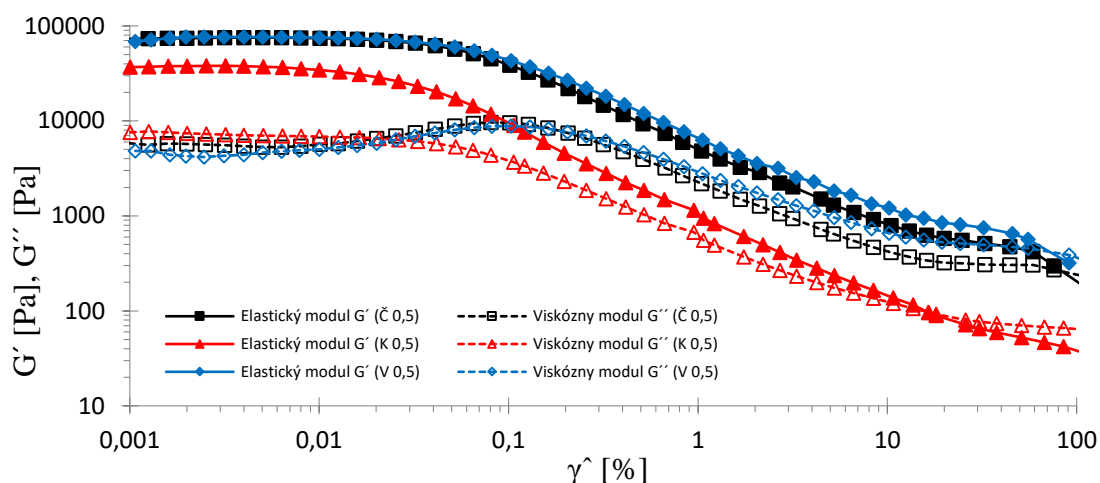
Obr. 29 Grafické zobrazenie vývinu elastického (G') a viskózneho (G'') modulu vápenej malty s čadičovým kamenivom v závislosti na amplitúde deformácie



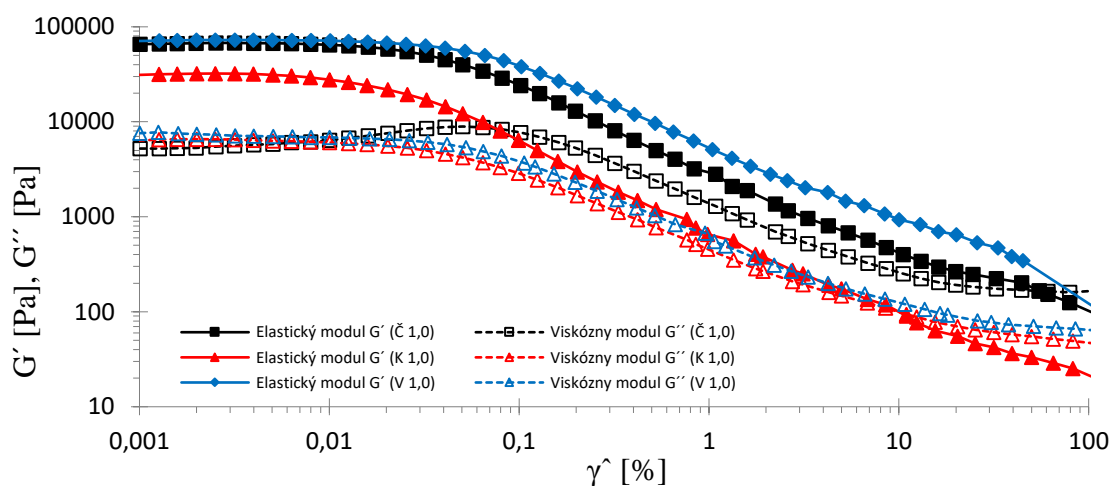
Obr. 30 Grafické zobrazenie vývinu elastického (G') a viskózneho (G'') modulu vápenej malty s kremenným pieskom v závislosti na amplitúde deformácie



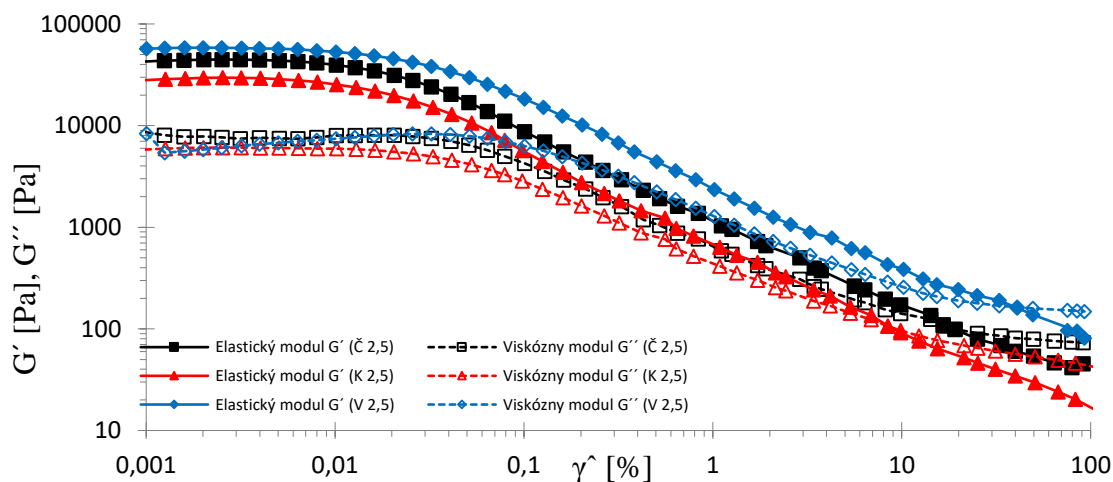
Obr. 31 Grafické zobrazenie vývinu elastického (G') viskózneho (G'') modulu vápenej malty s vápencovým kamenivom v závislosti na amplitúde deformácie



Obr. 32 Grafické zobrazenie vývinu elastického (G') a viskózneho (G'') modulu vápennej malty s kamenivom frakcie 0-0,5 mm v závislosti na amplitúde deformácie



Obr. 33 Grafické zobrazenie vývinu elastického (G') a viskózneho (G'') modulu vápennej malty s kamenivom frakcie 0-1,0 mm v závislosti na amplitúde deformácie



Obr. 34 Grafické zobrazenie vývinu elastického (G') a viskózneho (G'') modulu vápennej malty s kamenivom frakcie 0-2,5 mm v závislosti na amplitúde deformácie

4.5.3. Oscilačné meranie – režim frekvencie

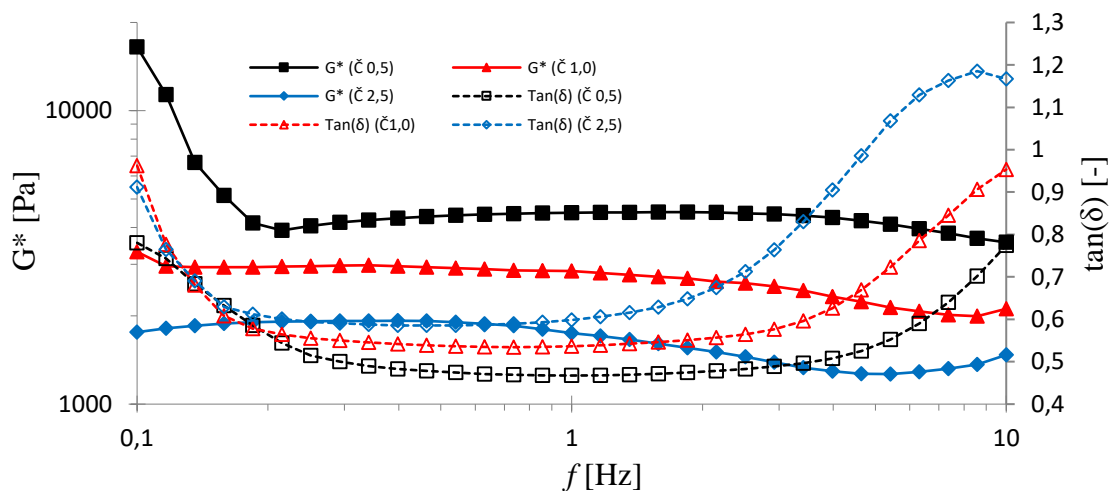
Na obrázkoch 34–36 sú zobrazené grafické výsledky oscilačného merania režimu frekvencie vápenných mált s čadičovým, vápencovým kamenivom a kremenným pieskom. Boli vyhodnocované komplexné moduly G^* a stratové faktory $\tan(\delta)$ v závislosti na frekvencii f . Hodnoty G^* a $\tan(\delta)$ pri hodnote 1 Hz sú zobrazené v tabuľke 8.

Najvyššie hodnoty komplexného modulu boli pri malte s kamenivom z drveného vápenca frakcie 0,5 mm. So zvyšujúcou sa frakciou kameniva táto hodnota klesala. To znamená, že malta s vápencovým kamenivom najnižšej frakcie mala najpevnejšiu aj najhustejšiu mikroštruktúru a jej správanie sa najviac približovalo k správaniu sa tuhej látky. Naopak malta s kamenivom z kremenného piesku vykazovala najnižšie hodnoty komplexného modulu, ktoré so zvyšujúcou sa frakciou klesali.

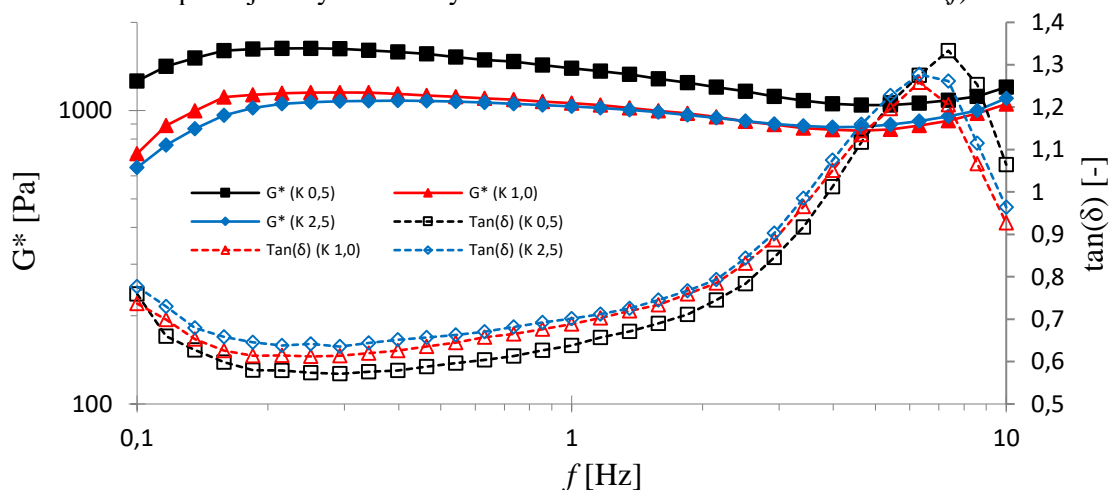
Všetky namerané hodnoty stratových faktorov boli menšie ako 1, čo znamená, že všetky malty vykazovali elastické správanie. Najvyššie hodnoty boli namerané pri vápenných maltách s kamenivom z kremenného piesku, čo znamená, že tieto malty sa najviac približovali hodnote 1 kedy sa malta začína správať ako viskózna. Tieto hodnoty so zvyšujúcou sa frakciou kameniva stúpali pri všetkých skúšaných maltách. Najnižšie hodnoty boli namerané pri maltách s kamenivom z drveného vápenca a najnižšia hodnota boli pri frakcii 0,5 mm.

Tab. 8 Tabuľka nameraných hodnôt komplexného modulu G^* a stratových faktorov $\tan(\delta)$ vápenných mált s rôznym druhom kameniva (Č – drvený čadič, V – drvený vápenec, K – kremenný piesok)

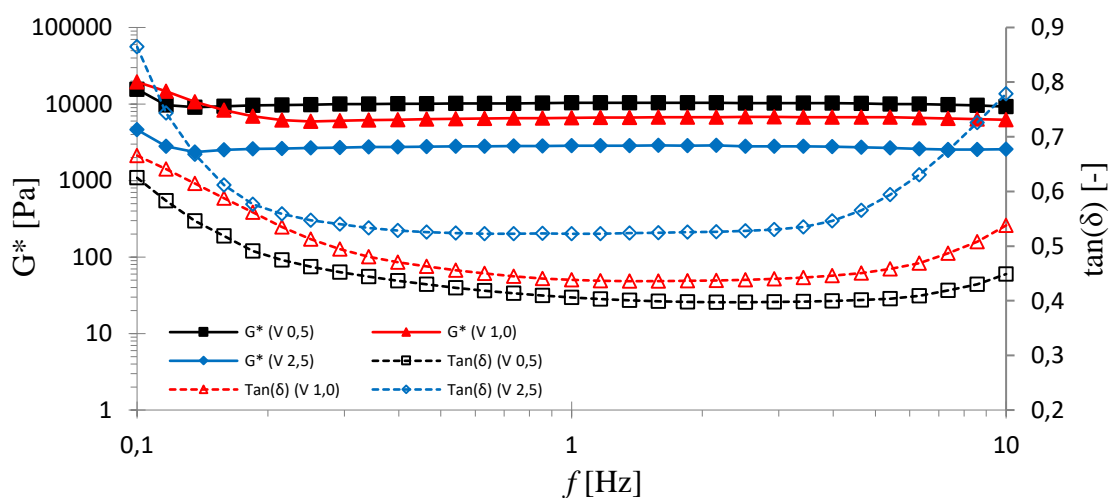
Označenie vzorky	G^* [Pa]	$\tan(\delta)$ [-]
K 0,5	1431	0,64
K 1	1075	0,69
K 2,5	1045	0,70
V 0,5	10344	0,41
V 1	6602	0,44
V 2,5	2856	0,52
Č 0,5	4489	0,47
Č 1	2840	0,54
Č 2,5	1745	0,59



Obr. 35 Grafické zobrazenie vývinu komplexného modulu (G^*) a stratového faktoru ($\tan(\delta)$) vápennej malty s čadičovým kamenivom v závislosti na frekvencii (f)



Obr. 36 Grafické zobrazenie vývinu komplexného modulu (G^*) a stratového faktoru ($\tan(\delta)$) vápennej malty s kremenným pieskom v závislosti na frekvencii (f)



Obr. 37 Grafické zobrazenie vývinu komplexného modulu (G^*) a stratového faktoru ($\tan(\delta)$) vápennej malty s vápencovým kamenivom v závislosti na frekvencii (f)

5. Záver

Cieľom tejto bakalárskej práce bolo skúmať vplyv kameniva rôzneho druhu a granulometrie na reológiu vápenných mált.

Teoretická časť popisuje rozdelenie kvapalín z reologického hľadiska. Boli popísané základné reologické veličiny používané v reológii, ktoré slúžia na vyhodnotenie správania sa kvapalín nenewtonskej povahy. Boli popísané veličiny ako napr. viskozita, koeficient konzistencie, medza toku. Ďalej bolo popísané šmykové napätie a gradient rýchlosti, ktoré sa vyhodnocujú do tokových kriviek. Následne boli popísané základné reologické modely nenewtonských kvapalín, ktoré popisujú reologické správanie kvapalín a to pseudoplastické, dilatantné, binghamské a z časového hľadiska tixotropné a reopektické správanie. V teoretickej časti sú ďalej uvedené typy používaných reometrov a podrobnejšie popísané hlavne rotačné reometre a niektoré typy používaných geometrií. Ďalšia kapitola sa zaoberá reológiou vápenných mált, kde bol popísaný výpočtový model podľa ktorého sa vápenné malty správajú a vplyvy, ktoré ovplyvňujú reológiu vápenných mált a vplyv vybraných prísad na reológiu vápenných mált. Bol popísaný vplyv vodoretenčných prísad, vplyv plastifikátora a prevzdušňovacích prísad. Posledná kapitola teoretickej časti popisuje vplyv kameniva na vlastnosti vápenných mált.

Cieľom experimentálnej časti bolo skúmať vplyv kremenného, čadičového a vápencového kameniva s rôznou granulometriou na reológiu vápenných mált. Použité frakcie kameniva boli v intervale 0-0,5 mm, 0-1,0 mm a 0-2,5 mm. Pre každé kamenivo bola stanovená čiara zrnitosti a chemické zloženie. Podľa čiary zrnitosti bolo viditeľné, že drvené kamenivo z vápenca a čadiča malo vyšší podiel jemných častíc oproti kremennému piesku. Tvar zrna kremenného piesku bol guľatého tvaru oproti čadiču a vápencu, ktorých tvar zrna bol viac ostrohranný. Vodný súčiniteľ vápenných mált bol stanovený pomocou skúšky rozliatia a stanovoval sa na vápennej malte s vápencovým kamenivom najnižšej frakcie kvôli predpokladu najvyššej spotreby vody. Vodný súčiniteľ bol stanovený na hodnotu 1,4 a bol konštantný pre všetky skúšané malty.

Stanovenie tokových vlastností prebiehalo na rotačnom reometri so špeciálnou geometriou pre stavebné materiály. Merala sa závislosť šmykového napätia za rastúcej a klesajúcej rýchlosti deformácie. Výsledky sa vyhodnocovali pomocou modelu Hershel-Bulkey. Pri tomto meraní sa stanovovala medza toku, ktorá dosahovala najvyšších hodnôt pri vápennej malte s vápencovým kamenivom frakcie 0,5 mm. Vysoké hodnoty medze toku sa dajú využiť napríklad pri nanášaní malty na vertikálne povrchy, kedy malta vďaka vysokej hodnote medze toku zostane na stene dokedy veľkou nanesenou hrúbkou neprekoná medzu toku. Medza toku sa znižovala s rastúcou frakciou kameniva a najnižšie hodnoty dosahovala pri malte s plnivom z kremenného piesku.

Koeficient konzistencie bol najvyšší pri maltách s čadičovým kamenivom, naopak najnižšie hodnoty boli vyhodnotené pri kremennom piesku, ktoré boli spôsobené hladkým a guľatým tvarom zrna. Všetky skúšané malty sa správali pseudoplasticky, takže sa so zvyšujúcou rýchlosťou deformácie zriedľovali.

Vápenná malta s kamenivom z vápenca vykazovala pri frakcii 1,0 mm nárast šmykového napätia pri klesajúcej rýchlosti deformácie, čo mohlo byť zapríčinené ideálnym pomerom spojiva a merného povrchu zfn kameniva, kedy plnivo dokonalo obalilo zrná kameniva a urýchlilo sa vytváranie väzieb medzi plnivom a spojivom. Túto vzorku nebolo možné vyhodnotiť podľa modelu Hershel-Bulkley.

Pri oscilačnom meraní, keď bol reometer v režime amplitúdy sa vyhodnocovala dĺžka LVR. Ako najviac stabilná vápenná malta sa javila malta s kamenivom z čadiča a vápenca najnižšej frakcie. Malty s kamenivom z kremenného piesku mali približne rovnakú dĺžku LVR pri všetkých frakciách. Z toho vyplýva, že malty s drveným kamenivom majú dlhšie LVR ako malty s ťaženým kamenivom. Taktiež bod toku bol približne pri rovnakých hodnotách pri vápenčom a čadičovom kamenive oproti kremennému piesku. Malty s kremenným pieskom oveľa skôr začínali tiecť a správali sa ako kvapaliny.

Oscilačné meranie v režime frekvencie slúžilo na stanovenie komplexného modulu, ktorý dosahoval najvyššie hodnoty pri vápenných maltách s vápenčovým kamenivom najnižšej skúšanej frakcie 0,5 mm. Táto vzorka mala najpevnejšiu a najhustejšiu mikroštruktúru a jej správanie sa najviac podobalo tuhej látke. Opakom boli malty s kremenným pieskom, ktoré mali najnižšie hodnoty komplexného modulu. Všetky skúšané malty mali hodnoty stratového faktoru menšie ako 1, takže všetky sa správali ako elastické. Najbližšie k viskóznemu správaniu boli malty s kremenným pieskom.

Po porovnaní a zhodnotení získaných výsledkov je možné konštatovať, že na reológiu jemnozrnných vápenných mált má vplyv nielen tvar kameniva, ale aj jeho granulometria, hlavne obsah jemných častíc. Na ručné omietanie zvislých a stropných plôch sa podľa získaných výsledkov zdá vhodnejšie použitie vápenčového alebo čadičového kameniva. Na strojné tenkovrstvové omietanie bude vhodnejšie guľatejšie kremenné kamenivo, ktoré nezvyšuje viskozitu vápennej malty.

6. Zoznam použitej literatúry

- [1] *Reologie* [online]. Ústav fyziky a materiálového inžinýrství Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, [cit. 2017-10-03]. Dostupné z: http://ufmi.ft.utb.cz/texty/kzm/KZM_03.pdf
- [2] HOLUBOVÁ, R. *Základy reologie a reometrie kapalin*. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 2014, ISBN 978-80-244-4178-8.
- [3] *Seminář reologie* [online]. In: Pragolab, 2015, [cit. 2017-10-25]. Dostupné z: https://www.pragolab.cz/files/download/Seminar_reologie_2015.pdf
- [4] BARNES, H.A. *An introduction to rheology*. Amsterdam: Elsevier, 1998. ISBN 04-448-7469-0.
- [5] *Viscosity of Newtonian and non-Newtonian Fluids: Newtonian Fluids*. RheoSense [online]. [cit. 2017-10-17]. Dostupné z: <http://www.rheosense.com/applications/viscosity/newtonian-non-newtonian>
- [6] *Měření tokových vlastností* [online]. Ústav fyziky a materiálového inžinýrství Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně. [cit. 2017-11-12]. Dostupné z: http://ufmi.ft.utb.cz/texty/fyzika_pol/FP_05.pdf
- [7] JANALÍK, J. *Viskozita tekutin a její měření*. Ostrava: VŠB TU Ostrava, 2010, ISBN 13-978-0195154-51-1.
- [8] ÚSTAV CHEMICKÝCH A HYDRAULICKÝCH STROJOV A ZARIADENÍ Strojnícka fakulta STU v Bratislave [online]. [cit. 2017-12-04]. Dostupné z: <http://docplayer.gr/30942714-Procesne-strojnictvo-kapitola-3.html>
- [9] SCHRAMM, G. *A Practical Approach to Rheology and Rheometry*. 2nd Edition. Karlsruhe: Gebrueder HAAKE, 2000, ISBN 0.0.010.2–1998 II.
- [10] ANANDHA RAO, M. *Rheology of fluid, semisolid, and solid foods*. 3th Edition, New York: Springer, 2013. ISBN 978-1-4614-9229-0.
- [11] BJÖRN, Annik, Paula SEGURA DE LA MONJA, Anna KARLSSON, Jörgen EJLERTSSON a Bo H. SVENSSON. *Rheological Characterization*. KUMAR, Sunil. *Biogas*. InTech, 2012, ISBN 978-953-51-0204-5.
- [12] Viscosity: Viscosity measurement. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2017-12-03]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Viscosity>

- [13] HYUN, Kyu, Manfred WILHELM, Christopher O. KLEIN, et al. A review of nonlinear oscillatory shear tests: Analysis and application of large amplitude oscillatory shear (LAOS). *Progress in Polymer Science*, 2011, **36**(12), 1697-1753.
- [14] GOODYER, Steve. *Measuring Polymers using a Rotational Rheometer in Oscillatory Mode*. In: *Www.anton-paar.com* [online]. [cit. 2017-12-27]. Dostupné z: http://www.t-p-a.org/archive/papers/15052013/Measuring_Polymers_using_a_Rotational_Rheometer_in_Oscillatory_Mode.pdf
- [15] ARES - G2 RHEOMETER brochure. *TAINstruments: ARES - G2* [online]. 2014 [cit. 2017-12-27]. Dostupné z: <http://www.tainstruments.com/wp-content/uploads/BROCH-ARESG2-2014-EN.pdf>
- [16] HILL, A. *Rheology school: Introducing Rotational Rheology & Kinexus* [online]. UK: Malvern Instruments Limited, 2016, 89 s. [cit. 2017-12-27]. Dostupné z: http://www.anamet.cz/sites/all/storage/01_Introducing_Rheology_and_Kinexus.pdf
- [17] *Escubed limited: Rheological Analysis: Rheology Oscillation and Thixotropy – Application Note* [online]. [cit. 2017-12-22]. Dostupné z: <http://88.208.209.19/~escbu/wp-content/uploads/2016/08/AN009-Rheology-oscillation-and-thixotropy-rev-0.pdf>
- [18] SEABRA, M.P., J.A. LABRINCHA a V.M. FERREIRA. Rheological behaviour of hydraulic lime-based mortars. *Journal of the European Ceramic Society*, 2007, **27**, 1-7.
- [19] NEČAS, Radovan, Martin BOHÁČ a Vladimír PERSAN. *Vliv historických přísad na vlastnosti vápenných kaší a malt: Mechanismus účinku přísad do malty* [online]. [cit. 2018-01-04]. Dostupné z: <http://stavba.tzb-info.cz/beton-malty-omitky/10511-1-vliv-historickych-prisad-na-vlastnosti-vapennych-kasi-a-malt>
- [20] ELLIS, S., M. LAWRENCE a P. WALKER. A Critical Review of the Effect of Calcitic Aggregate on Air Lime Mortar. *Chemistry and Materials Research*. Rabat, 2013, **5**, 1-5.
- [21] WESTERHOLM, Mikael, Bjorn LAGERBLAD, Johan SILFWERBRAND a Eric FORSSBERG. Influence of fine aggregate characteristics on the rheological properties of mortars. *Cement & Concrete Composites*, 2008, **30**, 1-9.
- [22] BOUNEDJEMA, Yassine, Karim EZZIANE a Ahmed HALLAL. Variation of mechanical and rheological properties of mortar by replacement of natural sand with crushed sand. *Journal of Adhesion Science and Technology*. 2016, **31**, 182-201.
- [23] STEFANIDOU, M. a I. PAPAYIANNI. The role of aggregates on the structure and properties of lime mortars. *Cement & Concrete Composites*. 2005, **27**, 914-919.
- [24] PAVÍA, S. a B. TOOMEY. Influence of the aggregate quality on the physical properties of natural feebly-hydraulic lime mortars. *Materials and Structures*. 2008, **41**(3), 559-569.

- [25] ŽIŽLAVSKÝ, Tomáš. *Vliv použitého kameniva na vlastnosti vápenných malt*. Brno, 2017. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Martin Vyšvařil.
- [26] VYŠVAŘIL, M a T ŽIŽLAVSKÝ. Effect of chitosan ethers on fresh state properties of lime mortars. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 2017, **251**.
- [27] RUIZ-AGUDO, E. a C. RODRIGUEZ-NAVARRO. Microstructure and Rheology of Lime Putty. *Langmuir*. 2010, **26**(6), 3868-3877 .
- [28] SEABRA, M.P., Joao A. LABRINCHA a Victor M. FERREIRA. Ageing Effect on Aerial Lime Mortars Rheology. *Materials Science Forum*. 2008, **588**, 872-876.
- [29] HEGROVÁ, Michaela. *Vliv etheru celulózy na reologické vlastnosti vápna*. Brno, 2018. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Martin Vyšvařil.
- [30] VYŠVAŘIL Martin, Michaela HEGROVÁ a Tomáš ŽIŽLAVSKÝ. Rheological Properties of Lime Mortars with Guar Gum Derivatives. *Key Engineering Materials*. 2018, **760**, 257 – 265.
- [31] ČSN EN 1015-3. Zkušební metody malt pro zdivo: Část 3: Stanovení konzistence čerstvé malty (s použitím střešacího stolku). 1. Český normalizační institut, 2000.

7. Zoznam použitých obrázkov

- Obr. 2** Zobrazenie rýchlostného toku v kvapaline medzi nepohyblivou a pohyblivou doskou [2]
- Obr. 2** Zobrazenie častíc v newtonovej kvapaline pod vplyvom toku: a) orientácia, b) napriamenie, c) deformácia, d) rozomletie [2]
- Obr. 3** Tok medzi dvoma rovnobežnými doskami [9]
- Obr. 4** Prechod kvapaliny z elastického do tokového správania po dosiahnutí medze toku [3]
- Obr. 5** Usporiadanie guľových častíc v suspenzii pri dilatantnom chovaní tekutín (stav A - kvapalina v pokoji, stav B – zvyšujúci sa rýchlostný gradient, suspenzia dilatuje a je nedostatok maziva medzi zrnami, čím sa zvyšuje trenie)[7]
- Obr. 6** Toková krivka reopektickej (vľavo) a tixotropnej kvapaliny (vpravo) [7]
- Obr. 7** Porovnanie tokových kriviek jednotlivých správaní tekutín: 1. newtonova kvapalina, 2. pseudoplastická kvapalina, 3. dilatantná kvapalina, 4. binghamova kvapalina [7]
- Obr.8** Schéma geometrie valec - valec [3]
- Obr. 9** Schéma geometrie kužeľ - doska [3]
- Obr. 10** Schéma geometrie doska - doska [3]
- Obr.11** Závislosť fázového uhla na správaní vzorky [15]
- Obr. 12** Zobrazenie lineárnej viskoelastickej oblasti LVR [16]
- Obr. 13** Grafické znázornenie kritickej šmykovej deformácie γ_c a bod toku γ_f [29]
- Obr. 14** Vývoj pevnosti a pórovitosti vo vápenných maltách v závislosti na čase pri rôznej granulometrii kameniva a pomere spojiva ku kamenivu 1:1,5 (S = pevnosť, P = pórovitosť) [23]
- Obr. 15** Vývoj pevností vo vápenných maltách v závislosti na čase pri rôznej granulometrii a pomere spojiva ku kamenivu 1:2,5 (vľavo) a 1:3 (vpravo) [23]
- Obr. 16** Mikroskopická snímka tvaru zrna drveného vápenca
- Obr. 17** Mikroskopická snímka tvaru zrna drveného čadiča
- Obr. 18** Mikroskopická snímka tvaru zrna kremenného piesku
- Obr. 19** Čiara zrnitosti čadičového, vápencového a kremenného kameniva
- Obr. 20** Vľavo rotačný reometer Discovery HR – 1, vpravo použitá geometria [29]
- Obr. 21** Toková krivka vápennej malty s čadičovým kamenivom rôznej frakcie (Č – drvený čadič)
- Obr. 22** Toková krivka vápennej malty s kremenným pieskom rôznej frakcie (K – kremenný piesok)
- Obr. 23** Toková krivka vápennej malty s vápencovým kamenivom rôznej frakcie (V – drevný vápenec)
- Obr. 24** Toková krivka vápennej malty rôznym kamenivom frakcie 0,5 mm (Č – drvený čadič, V – drevný vápenec, K – kremenný piesok)
- Obr. 25** Toková krivka vápennej malty rôznym kamenivom frakcie 1,0 mm (Č – drvený čadič, V – drevný vápenec, K – kremenný piesok)
- Obr. 26** Toková krivka vápennej malty rôznym kamenivom frakcie 2,5 mm (Č – drvený čadič, V – drevný vápenec, K – kremenný piesok)
- Obr. 27** Porovnanie klesajúcich tokových kriviek všetkých skúšaných vápenných mált (Č – drvený čadič, V – drevný vápenec, K – kremenný piesok)
- Obr. 28** Grafické zobrazenie vývinu šmykového napätia v čase pri konštantnej rýchlosti deformácie vápennej malty s vápencovým kamenivom

- Obr. 29** Grafické zobrazenie vývinu elastického (G') a stratového (G'') modulu vápennej malty s čadičovým kamenivom v závislosti na amplitúde deformácie γ^{\wedge}
- Obr. 30** Grafické zobrazenie vývinu elastického (G') a stratového (G'') modulu vápennej malty s kremenným pieskom v závislosti na amplitúde deformácie γ^{\wedge}
- Obr. 31** Grafické zobrazenie vývinu elastického (G') a stratového (G'') modulu vápennej malty s vápencovým kamenivom v závislosti na amplitúde deformácie
- Obr. 32** Grafické zobrazenie vývinu elastického (G') a stratového (G'') modulu vápennej malty s kamenivom frakcie 0-0,5 mm v závislosti na amplitúde deformácie
- Obr. 33** Grafické zobrazenie vývinu elastického (G') a stratového (G'') modulu vápennej malty s kamenivom frakcie 0-1,0 mm v závislosti na amplitúde deformácie
- Obr. 34** Grafické zobrazenie vývinu elastického (G') a stratového (G'') modulu vápennej malty s kamenivom frakcie 0-2,5 mm v závislosti na amplitúde deformácie
- Obr. 35** Grafické zobrazenie vývinu komplexného modulu (G^*) a stratového faktoru ($\tan(\delta)$) vápennej malty s čadičovým kamenivom v závislosti na frekvencií
- Obr. 36** Grafické zobrazenie vývinu komplexného modulu (G^*) a stratového faktoru ($\tan(\delta)$) vápennej malty s kremenným pieskom v závislosti na frekvencií
- Obr. 37** Grafické zobrazenie vývinu komplexného modulu (G^*) a stratového faktoru ($\tan(\delta)$) vápennej malty s vápencovým kamenivom v závislosti na frekvencií

8. Zoznam použitých tabuliek

Tab. 1 Porovnanie viskozity vody a glycerínu v závislosti na teplote [2]

Tab. 2 Vlastnosti, charakteristika a príklady niektorých typov tekutín [8]

Tab. 3 Chemické zloženie vápna CL90 – S, drveného vápenca, čadiča a kremenného piesku

Tab. 4 Namerané hodnoty rozliatia a hodnota vodného súčiniteľa

Tab. 5 Sypné hmotnosti a zloženie jednotlivých mált s rozdielnym druhom kameniva a frakcie (Č – drvený čadič, V – drvený vápenec, K – kremenný piesok)

Tab. 6 Hodnoty medze toku τ_0 , koeficientu konzistencie K a indexu toku n všetkých skúšaných vápenných mált (Č – drvený čadič, V – drvený vápenec, K – kremenný piesok)

Tab. 7 Tabuľka nameraných hodnôt lineárnej viskoelastickej oblasti LVR γ_{LVR} a bodov toku γ_f vápenných mált s rôznym druhom kameniva (Č – drvený čadič, V – drvený vápenec, K – kremenný piesok)

Tab. 8 Tabuľka nameraných hodnôt komplexného modulu G^* a stratových faktorov $\tan(\delta)$ vápenných mált s rôznym druhom kameniva (Č – drvený čadič, V – drvený vápenec, K – kremenný piesok)

9. Zoznam použitých skratiek a symbolov

τ	šmykové napätie [Pa]
τ_0	medza toku [Pa]
n	tokový index [-]
η	dynamická viskozita [Pa·s]
$\dot{\gamma}$	gradient rýchlosti deformácie [s ⁻¹]
ν	kinematická viskozita [mm ² ·s ⁻¹]
ρ	hustota [kg·m ⁻³]
F	sila [N]
A	plocha [m ²]
G^*	komplexný modul [Pa]
G'	modul elasticity [Pa]
G''	modul viskozity G'' [Pa]
$\tan(\delta)$	stratový faktor [-]
LVR	lineárna viskoelastická oblasť
γ_f	bod toku [%]
γ_c	kritické šmykové napätie [%]
$\hat{\gamma}$	amplitúda deformácie [%]
D_{max}	maximálna veľkosť zrna [mm]
f	frekvencia [Hz]
T	teplota [°C]
w	vodný súčiniteľ [-]
Ca(OH)₂	hydroxid vápenatý
CO₂	oxid uhličitý
CaCO₃	uhličitan vápenatý
H₂O	voda
CaO	oxid vápenatý
SiO₂	oxid kremičitý
Al₂O₃	oxid hlinitý
Fe₂O₃	oxid železitý
SO₃	oxid sírový
MgO	oxid horečnatý
Na₂O	oxid sodný
K₂O	oxid draselný
MnO	oxid manganatý
TiO₂	oxid titaničitý
Cr₂O₃	oxid chromitý
P₂O₅	oxid fosforečný
HPMC	hydroxypropylmethylcelulóza
HEMC	hydroxyethylmethylcelulóza
HEC	hydroxyethylcelulóza
VEAs	vodoretenčné prísady (viscosity enhancing admixtures)
HPCH	hydroxypropylchitosan
CMCH	karboxymetylchitosan

HPG	hydroxypropylguar
CMHPG	karboxymethylhydroxypropylguar
GG	guaranová guma
Č 0,5	vápenná malta s kamenivom z drevného čadiča frakcie 0-0,5 mm
Č 1,0	vápenná malta s kamenivom z drevného čadiča frakcie 0-1,0 mm
Č 2,5	vápenná malta s kamenivom z drevného čadiča frakcie 0-2,5 mm
V 0,5	vápenná malta s kamenivom z drevného vápenca frakcie 0-0,5 mm
V 1,0	vápenná malta s kamenivom z drevného vápenca frakcie 0-1,0 mm
V 2,5	vápenná malta s kamenivom z drevného vápenca frakcie 0-2,5 mm
K 0,5	vápenná malta s kamenivom z ťaženého kremenného piesku frakcie 0-0,5 mm
K 1,0	vápenná malta s kamenivom z ťaženého kremenného piesku frakcie 0-1,0 mm
K 2,5	vápenná malta s kamenivom z ťaženého kremenného piesku frakcie 0-2,5 mm